



TESIS – TE142599

**HYBRID QUADRATIC PROGRAMMING-
ENHANCED GENETIC ALGORITHM UNTUK
MENYELESAIKAN MASALAH DYNAMIC
OPTIMUM POWER FLOW**

TRISNA WATI

2215201201

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Rony Seto Wibowo, ST.,MT

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang,Msc.,Ph.D.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



TESIS – TE142599

**HYBRID QUADRATIC PROGRAMMING-
ENHANCED GENETIC ALGORITHM UNTUK
MENYELESAIKAN MASALAH DYNAMIC
OPTIMUM POWER FLOW**

TRISNA WATI

2215201201

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Rony Seto Wibowo, ST.,MT

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang,Msc.,Ph.D.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

TRISNA WATI

NRP. 2215201201

Tanggal Ujian : 30 Oktober 2017

Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:

1. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. (Pembimbing I)
NIP: 197411292000121001
2. Prof. Ir. H. Octoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D (Pembimbing II)
NIP: 194907151974121001
3. Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc. (Penguji)
NIP: 197007121998021001
4. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. (Penguji)
NIP: 197311192000031001
5. Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. (Penguji)
NIP: 198109052005011002

Dekan Fakultas Teknologi Elektro



Dr. Ir. Arief Sardjono, S.T., M.T.

NIP: 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**HYBRID QUADRATIC PROGRAMMING - ENHANCED GENETIC ALGORITHM UNTUK MENYELESAIKAN MASALAH DYNAMIC OPTIMUM POWER FLOW** ” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Oktober 2017

Trisna Wati

NRP.2215201201



Halaman ini sengaja dikosongkan


HYBRID QUADRATIC PROGRAMMING - ENHANCED GENETIC ALGORITHM UNTUK MENYELESAIKAN MASALAH DYNAMIC OPTIMUM POWER FLOW

Nama mahasiswa : Trisna Wati
NRP : 2215201201
Pembimbing : 1. Rony Seto Wibowo, ST.,MT
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Enhanced Genetic Algorithm (E-GA) merupakan penyempurnaan dari metode *Genetic Algorithm*. Dalam penelitian terdahulu E-GA menggabungkan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *fuzzy* untuk menyelesaikan Optimum Power Flow (OPF) [9] tanpa mempertimbangkan *valve point effect*. Dalam penelitian ini E-GA disempurnakan dengan penambahan operator kromosom, dengan inisialisasi awal menggunakan *Quadratic Programming* (QP) untuk menyelesaikan permasalahan OPF dengan pembebanan selama 24 jam dan mempertimbangkan fungsi biaya *valve point effect* (VPE) dengan memperhatikan *ramp-rate*. Fungsi tujuan dari OPF adalah untuk meminimalkan biaya pembangkitan dengan tidak melanggar batasan-batasan sistem seperti batasan tegangan, *ramp rate*, batasan tap trafo, dan batasan generator. Dengan menerapkan E-GA diharapkan mampu menyelesaikan OPF dengan pembebanan selama 24 jam dengan biaya pembangkitan yang minimum, dibandingkan dengan metode E-GA [9] sebelumnya.

Kata kunci: *Dynamic Optimum Power Flow, Genetic Algorithm, optimasi biaya*



Halaman ini sengaja dikosongkan

HYBRID QUADRATIC PROGRAMMING-ENHANCED GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING DYNAMIC OPTIMUM POWER FLOW PROBLEM

By : Trisna Wati
Identity Number : 2215201201
Supervisor (s) : 1. Rony Seto Wibowo, ST.,MT
2. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Enhanced Genetic Algorithm (E-GA) is a refinement of the Genetic Algorithm method. In a previous, E-GA combine Particle Swarm Optimization (PSO) and fuzzy to complete Optimum Power Flow (OPF) [9] without valve point effect. In this study, E-GA was enhanced by the addition of chromosome operators, with initialization using Quadratic Programming (QP) to solve OPF problems with 24-hour loading with valve point effect (VPE). The objective function is to minimize generating costs by not breaking system boundaries such as voltage limits, street level, tap transformer limits, and generator limits. E-GA implementation to solve OPF with 24-hour loading on minimum generation costs, and compared with previous E-GA methods [9].

Keywords: *Dynamic Optimum Power Flow, Genetic Algorithm, cost optimization*



Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamin rasa syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat Nya penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul **" HYBRID QUADRATIC PROGRAMMING-ENHANCED GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING DYNAMIC OPTIMUM POWER FLOW PROBLEM"**.

Tesis ini dapat tersusun berkat bantuan dari semua pihak, untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tesis ini, tak lupa juga penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Ibuku tercinta Kasiyani, mbak Emi, mas Endik dan adikku Erlina telah memberikan dukungan penuh sehingga dapat menjadi motivator untuk menyelesaikan Tesis ini.
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST.MT dan Prof Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D selaku dosen pembimbing Tesis, yang telah membimbing dan memberi semangat dalam penyusunan Tesis ini.
3. Seluruh Dosen Elektro yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan selama penulis belajar di Institut Sepuluh Nopember.
4. Teman-temanku seperjuangan S2 Teknik Sistem Tenaga Genap 2015/2016, mas Iwan, Khalil, mas Isa, Dini, Lia, Niken, mas Wildan, Pak Alfin, Pak Alfredo, mas Kintrung, yang telah banyak membantu dan memberi semangat dalam penyusunan Tesis ini.
5. Teman-Teman S2 Teknik Sistem Tenaga Ganjil 2016/2017, Santi, Elok, Maya.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan Tesis ini mungkin masih terdapat kekurangan. Namun penulis telah berusaha sekuat tenaga dan pikiran untuk memperoleh hasil Tesis dengan baik. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan penulis demi kesempurnaan Tesis ini.

Akhir kata penulis berharap semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan pembaca pada umumnya



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Kontribusi	3
1.6 Metodologi Penelitian	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Perkembangan Optimum Power Flow	7
2.2 Teori Dasar	9
2.2.1 Permasalahan pada Optimum Power Flow	9
2.2.2 Karakteristik Unit Pembangkit	10
2.2.3 Batasan Kemampuan Generator	11
2.3 Genetic Algorithm	12

2.4	Enhanced Genetic Algorithm	14
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		17
3.1	Analisis Optimum Power Flow	17
3.2	Valve Point Effect	19
3.3	Inisialisasi dan Representasi Populasi GA pada DOPF	20
3.4	Inisialisasi EGA menggunakan Quadratic Programming	21
3.5	Pengkodean Kromosom	23
3.6	Fitness Function	23
3.7	Seleksi	25
3.8	Pindah Silang.....	25
3.9	Mutasi.....	26
3.10	<i>Enhanced Genetic Algorithm</i>	26
3.11	Modifikasi operator kromosom.....	27
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Simulasi 1	33
4.2	Simulasi 2	37
BAB 5 KESIMPULAN		39
DAFTAR PUSTAKA.....		41
LAMPIRAN		43
DAFTAR INDEX.....		51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva Input-Output Pembangkit Termal [1].....	11
Gambar 2.2	Skema Enhanced Genetic Algorithm	15
Gambar 3.1	Kurva Biaya Bahan Bakar Non-Smooth	20
Gambar 3.2	Struktur kromosom GA.....	21
Gambar 3.3	Gene Swap Operator	27
Gambar 3.4	Gene Cross-Swap Operator.....	27
Gambar 3.5	Gene Copy Operator.....	28
Gambar 3.6	Gene Inverse Operator	28
Gambar 3.7	Gene Max-Min Operator.....	28
Gambar 3.8	Alur pengerjaan DOPF menggunakan EGA	29
Gambar 4.1	Diagram Satu Garis IEEE 30 Bus	33
Gambar 4.2	Karakteristik Kurva VPE masing-masing pembangkit	31
Gambar 4.3	Biaya masing-masing pembangkit	33
Gambar 4.4	Total Biaya selama 24 Jam dengan VPE dan tanpa VPE	36
Gambar 4.5	Grafik konvergensi EGA-PSO dan EGA-QP tanpa Valve Point Effect.....	37
Gambar 4.6	Grafik konvergensi EGA-PSO dan EGA-QP dengan Valve Point Effect.....	38



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kemampuan Ramp Rate Tiap Jenis Pembangkit.....	12
Tabel 4.1	Data Pembangkit IEEE 30 Bus	32
Tabel 4.2	Rata-rata total biaya dengan 20 kali percobaan	38



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang Masalah

Sistem tenaga listrik selalu berkembang dengan seiring berjalannya waktu. Semakin tahun permintaan akan kebutuhan energi listrik semakin meningkat, sedangkan ketersediaan bahan bakar juga semakin menipis sehingga biaya pembangkitan menjadi mahal. Dalam suatu sistem tenaga listrik, unit-unit pembangkit tidak berada dalam jarak yang sama dari pusat beban, dan biaya pembangkitan tiap pembangkit berbeda. Pada kondisi operasi normal kapasitas pembangkitan harus lebih besar dari jumlah beban dan rugi-rugi daya pada suatu sistem. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu pengaturan terhadap pembangkitan. Analisis aliran daya optimal adalah suatu perhitungan untuk meminimalkan suatu fungsi tujuan yaitu biaya pembangkitan atau rugi-rugi transmisi dengan mengatur daya reaktif dan daya aktif pembangkitan tiap pembangkit sistem tenaga yang terinterkoneksi dengan memperhatikan batasan-batasan tertentu. Analisis aliran daya optimal untuk meminimalkan biaya pembangkitan dikenal dengan istilah *Economic Dispatch* [1]. *Economic Dispatch* terdiri dari total biaya yang diperlukan antara unit pembangkit termal yang tersedia, dengan asumsi bahwa unit commitment termal telah ditentukan sebelumnya. Penjadwalan dinamis yang melayani beban tertentu selama satu jam, namun tidak dapat bekerja untuk jam berikutnya (atau beberapa jam ke depan), tergantung pada permintaan, karena pembangkitan tiap unit tidak dapat diubah secara signifikan. Masalah ini dapat diminimalkan dengan mengadopsi penjadwalan dinamis untuk siklus 24 jam dan mempertimbangkan batasan-batasan dikenal dengan *Dynamic Economic Dispatch* (DED) [2]. DED bertujuan untuk meminimalkan biaya operasional secara keseluruhan dengan memenuhi tuntutan beban perjam, ramp rate, dan batasan-batasan lainnya. Batasan tersebut meliputi ramp rate, kapasitas pembangkit dan *balance constraint*, secara konvensional fungsi biaya pembangkit termal adalah kuadrat, namun pada kehidupan nyata pembangkit uap yang berkapasitas besar memiliki cadangan bahan bakar lain sehingga menyebabkan terjadinya riak pada fungsi biaya, secara konvensional fungsi biaya pembangkit termal adalah kuadrat,

namun pada kehidupan nyata pembangkit uap yang berkapasitas besar memiliki cadangan bahan bakar lain sehingga menyebabkan terjadinya riak pada fungsi biaya, sedangkan uap katup dikenal sebagai *Valve Point Effect* (VPE) [3], sehingga fungsi biaya menjadi kuadrat, *non-smooth*, *non-convex* dan mempunyai karakteristik *multi-modal*. Masalah DED dan rugi-rugi transmisi juga dapat diselesaikan dengan menggunakan *Optimal Power Flow* (OPF). Secara umum OPF dapat didefinisikan sebagai *non-linier*, *non-convex*, *multi-dimensional* dan berbagai macam permasalahan yang kompleks tergantung pada saluran dan data bus. Sistem parameter untuk fungsi objektif meliputi biaya emisi bahan bakar, perbaikan profil tegangan, stabilitas tegangan dan rugi-rugi transmisi. Penyelesaian OPF dapat menggunakan metode matematis dan *artificial intelegent*. Mota-Palomino dan Quintana [4] menggunakan *linier programming* untuk menyelesaikan OPF, output yang dihasilkan cepat dan aman daripada menggunakan *nonlinier programming* karena tingkat konvergen yang rendah sehingga tidak cocok untuk menyelesaikan fungsi objektif *non-smooth*. Metode pendekatan *quadratic programming* yang diusulkan oleh Burchett *et al* [5] memerlukan titik awal agar tidak terjebak dalam lokal minimum dan sangat bergantung pada pengaturan awal. Metode matematis memiliki kekurangan sehingga banyak peneliti yang telah mengembangkan metode optimasi menggunakan *artificial intelegent* berbasis populasi seperti *Differential Search Algorithm* (DSA) untuk menyelesaikan OPF menggunakan single dan multiobjective function pada IEEE 9-Bus, IEEE 30-Bus, dan IEEE 57-Bus dapat menyelesaikan permasalahan *non-convex* dan *non linier* problem dibandingkan dengan metode lain [6], *Differential Evolution* (DE) [7], *Evolutionary Programming* [8], Kumari M.S menggunakan *Enhanced Genetic Algorithm* (EGA) dengan penambahan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Fuzzy* untuk fungsi multi objektif, dimana menggunakan tiga fungsi objektif yaitu fungsi biaya pembangkitan, transmisi loss, dan voltage stability [9], telah berhasil diterapkan untuk menyelesaikan masalah OPF, namun kelemahan dari metode ini adalah proses iterasi yang panjang dan terjebak lokal minimum.

Dari studi literatur yang diperoleh maka penulis akan meneliti tentang *Enhanced Genetic Algorithm* (E-GA) dengan penambahan operator kromosom dengan inisialisasi awal menggunakan *Quadratic Programming* (QP) untuk operator kromosom dengan inisialisasi awal menggunakan *Quadratic Programming* (QP) untuk menyelesaikan DOPF dengan optimisasi fungsi objektif untuk meminimalkan biaya pembangkitan

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan di selesaikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Program dynamic optimal power flow menggunakan EGA-QP dan EGA-PSO.
2. Pengaruh *valve point effect* terhadap biaya pembangkitan yang dynamic.
3. Meminimalkan biaya pembangkitan dengan memperhatikan *ramp-rate*.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui performa EGA dengan penambahan operator kromosom dan inisialisasi QP yang nantinya akan dibandingkan dengan *enhanced genetic algorithm* dengan penambahan PSO dan Fuzzy.
2. Mengetahui biaya pembangkitan dengan *valve point effect* maupun dengan tidak menggunakan *valve point effect*.
3. Mengetahui biaya pembangkitan minimal dengan memperhatikan batasan sistem.

1.4 Batasan Masalah

Batasan dari penelitian ini adalah rugi emisi tidak diperhitungkan dan stabilitas tegangan dianggap baik, serta kenaikan beban dianggap per satu jam. Permasalahan DOPF diformulasikan sebagai (i) biaya operasional pembangkitan, (ii) biaya bahan bakar, dan (iii) kerugian saluran transmisi.

1.5 Kontribusi

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah menerapkan E-GA dengan penambahan operator kromosom dengan inisialisasi awal menggunakan QP untuk meminimalkan biaya pembangkitan pada *Dynamic Optimum Power Flow* (DOPF) yang akan diuji pada standard IEEE 30-Bus, dengan pengujian pertama pada 30-Bus dengan tidak memperhitungkan *valve point effect* sedangkan pengujian kedua memperhitungkan *valve point effect*. Harapannya adalah mengetahui biaya pembangkitan yang paling minimum. Untuk penelitian selanjutnya dapat menambahkan fungsi objektif dan memperhitungkan rugi-rugi emisi untuk energi terbarukan.

1.6 Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini EGA-QP dengan *valve point effect* dan memperhatikan batasan ramp rate generator, *enhanced genetic algorithm* merupakan pengembangan dari *genetic algorithm* yang digunakan untuk menyelesaikan masalah *dynamic optimal power flow*. Tahapan dalam pengerjaan penelitian ini adalah:

1. Studi literatur

Literatur yang digunakan mengacu pada paper *conference*, jurnal, dan buku cetak. Literatur yang dipelajari mengenai *valve point effect*, *optimal power flow*, dan *genetic algorithm*.


2. Pengumpulan data

Data yang dibutuhkan adalah data pembangkitan, data beban, dan data saluran. Data pembangkitan terdiri dari kapasitas pembangkitan, koefisien biaya *valve point effect*, dan ramp rate. Data saluran terdiri dari impedansi dan kapasitas saluran. Data beban yaitu beban dinamis selama 24 jam dengan rentang waktu 1 jam.

3. Simulasi dan analisis

Simulasi yang digunakan menggunakan *enhanced genetic algorithm* dan *genetic algorithm* kemudian dibandingkan metode mana yang menghasilkan biaya pembangkitan yang paling minimum.

4. Penulisan buku



Hasil penelitian yang telah dilakukan, dilaporkan dalam bentuk laporan tesis serta dipublikasikan pada seminar internasional. Laporan ditulis berdasarkan kesimpulan dan hasil analisis beserta tahapannya.



Halaman Ini Sengaja di kosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Perkembangan Optimum Power flow (OPF)

Tren yang sedang berkembang dalam penelitian OPF dapat dilihat dalam beberapa paper, pada tahun 1984 Burchett *et al* [5] OPF digunakan untuk menyelesaikan masalah persamaan aliran daya listrik, pada waktu yang sama digunakan untuk meminimalkan biaya bahan bakar. Masalah optimisasi yang dihasilkan memiliki kendala yaitu nonlinier batasan dari persamaan aliran listrik dan kendala *bound constraint* pada variabel dari tegangan peralatan dan batasan termal. Metode yang digunakan adalah *Quadratic Program* (QP) untuk menyelesaikan permasalahan *non linier*. QP digunakan untuk menganalisis dari turunan persamaan aliran dan fungsi tujuan yang non linier. Pengujian QP menunjukkan bahwa algoritma tersebut dapat konvergen dan menghasilkan iterasi yang efisien. OPF juga dapat diselesaikan dengan menggunakan metode lagrangian, *Quasi – Newton* untuk *linier constraint*. Namun bagaimanapun juga penyelesaian masalah secara konvensional jika digunakan pada sistem skala besar memerlukan waktu perhitungan yang lama, kurang akurat dan andal.

Metode optimisasi konvensional memerlukan titik awal agar tidak terjebak dalam lokal minimum. Setelah beberapa parameter di pilih, kualitas penyelesaian masalah sangat tergantung pada pengaturan parameter awal. Karena kelemahan pada metode konvensional dan dengan seiring berkembangnya teknologi computer, metode optimisasi berbasis populasi untuk sistem tenaga telah berkembang pesat. Metode optimisasi berbasis populasi menggunakan pemilihan secara acak agar tidak terjebak dalam lokal minimum, dan untuk mengatasi masalah *non-linier* dalam skala besar.

Abaci dan Yamacli [6] menggunakan metode *Differential Search Algorithm* (DSA) untuk menyelesaikan masalah OPF, parameter yang digunakan adalah tegangan bus, beban tap changer dan nilai-nilai shunt kapasitansi yang dioptimalkan untuk fungsi tujuan tunggal dan multi tujuan. Hasil yang diperoleh

dari penerapan DSA adalah efektif digunakan untuk untuk memecahkan masalah OPF dalam skala besar, *non-linier* dan *non-convex* karena kualitas yang tinggi dan kecepatan konvergensi yang cepat.

Sivasubramani dan Swarup [7] mengusulkan sebuah algoritma hybrid menggabungkan *Sequential Quadratic Programming* (SQP) dan algoritma *Differential Evolutionary* (DE) untuk menyelesaikan OPF dengan mempertimbangkan *valve-point effect*. Dalam metode ini, SQP pertama kali digunakan untuk memecahkan masalah OPF dengan variabel diskrit, setelah dibulatkan kemudian digunakan untuk inisialisasi individu pada DE. Metode SQP dapat mencari solusi yang paling optimal ketika fungsi tujuannya adalah *convex*, terdiferensiasi dan *smooth*. Namun metode SQP tidak dapat menghasilkan nilai yang optimum ketika fungsi tujuannya menjadi *non-convex* dan *non-smooth*, namun sebaliknya DE dapat menemukan solusi optimum terlepas dari fungsi-fungsi tersebut namun DE memiliki kelemahan yaitu iterasi dan konvergensi yang kurang baik. Sehingga digunakanlah metode hybrid untuk menyelesaikan masalah optimisasi dengan fungsi *non-convex*.

Kumari dan Maheswarapu [9] OPF dapat diselesaikan untuk meminimalkan biaya pembangkitan yang memenuhi persamaan power balance dan batasan sistem. Namun berdasarkan fungsi biaya OPF dapat menimbulkan kerugian sistem. OPF dirumuskan sebagai multi tujuan, dimana pengaturan kontrol optimum untuk meminimalkan biaya bahan bakar dan losses, kerugian dan stabilitas tegangan. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah tersebut adalah *Enhanced Genetic Algorithm* (E-GA), yaitu menambahkan proses PSO dan *Fuzzy*.

Bakirtzis *et al* menggunakan Enhanced Genetic Algorithm (EGA) dengan penambahan operator kromosom [12] untuk menyelesaikan OPF dengan dua variabel kontrol yang kontinu dan diskrit. Variabel kontrol kontinu dimodelkan dengan besaran tegangan generator bus, sedangkan diskrit mengatur tap transformer dan peralatan *shunt switchable*. Fungsi operasi constraint seperti *branch flow limits*, load bus voltage, dan *reactive capability* disertakan dalam

fungsi fitness *Genetic Algorithm* (GA). Hasil yang diperoleh adalah pemodelan *capability* disertakan dalam fungsi fitness *Genetic Algorithm* (GA). Hasil yang diperoleh adalah pemodelan yang fleksibel, fungsi biaya unit *non-convex*, variabel kontrol diskrit, dan kompleks, kendala nonlinier dapat dengan mudah dimodelkan. Namun kelemahan dalam penerapan GA untuk OPF adalah tidak menjamin akan optimal, kerugian lainnya adalah waktu eksekusi dan kualitas solusi yang disediakan buruk dengan meningkatnya panjang kromosom.

2.2 Teori Dasar

2.2.1 Permasalahan pada Optimum Power Flow (OPF)

Optimal power flow adalah suatu penyelesaian masalah untuk kondisi operasi keadaan normal dari suatu sistem tenaga listrik. Pada umumnya perhitungan optimum power flow digunakan untuk merencanakan sistem tenaga dan perencanaan operasional dan untuk operasi kendali sistem tenaga listrik. Data yang diperoleh dari analisis optimal power flow digunakan untuk studi operasi normal, analisis kontingensi, penjadwalan optimum, *economic dispatch* dan stabilitas [1]. Dalam penulisan tesis ini peneliti menggunakan optimal power flow untuk menganalisis operasi normal dengan penambahan *valve point effect* untuk meminimalkan biaya dan tegangan pada suatu system dengan batasan-batasan tertentu.

Berbagai macam metode dikembangkan untuk menyelesaikan optimal power flow diantaranya adalah metode iterative didasarkan matriks-Y dari metode Gauss-Seidel. Metode Gauss-Seidel memerlukan iterasi yang kecil untuk sistem yang kecil, namun jika diterapkan pada sistem yang besar maka iterasi yang dibutuhkan juga semakin besar. Kemudian dikembangkanlah lagi metode untuk menyempurnakan Gauss-Seidel yaitu metode Newton-Rhapson. Metode ini didasarkan pada algoritma Newton-Raphson untuk penyelesaian persamaan kuadratik simultan dari jaringan daya. Berlawanan dengan algoritma Gauss-Seidel, metode ini memerlukan waktu yang lebih panjang per-iterasinya, namun jumlah iterasinya sedikit dan tidak tergantung pada ukuran jaringan. Oleh karenanya, masalah aliran daya yang tidak dapat diselesaikan dengan metode Gauss-Seidel (misalnya sistem dengan impedansi negatif) dapat diselesaikan

secara mudah dengan metode ini. Oleh sebab itu maka peneliti menggunakan metode Newton-Rhapson untuk menghitung optimal power flow.

Masalah optimum power flow didefinisikan sebagai perhitungan dari aliran-aliran saluran daya dan tegangan bus dari suatu sistem tenaga listrik pada kondisi beban dan pembangkitan tertentu. Persamaan (2.1) menunjukkan kondisi satu bus (bus i) pada system tenaga listrik menggunakan hukum kirchoff untuk arus:

$$I_{Gi} = I_{Li} + I_{Ti} \quad (2.1)$$

Dari persamaan (2.1) dikonjugitkan menjadi :

$$I_{Gi}^* = I_{Li}^* + I_{Ti}^* \quad (2.2)$$

Kemudian mengalikannya dengan V_i :

$$V_i I_{Gi}^* = V_i I_{Li}^* + V_i I_{Ti}^* \quad (2.3)$$

atau :

$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti} \quad (2.4)$$

Dimana:

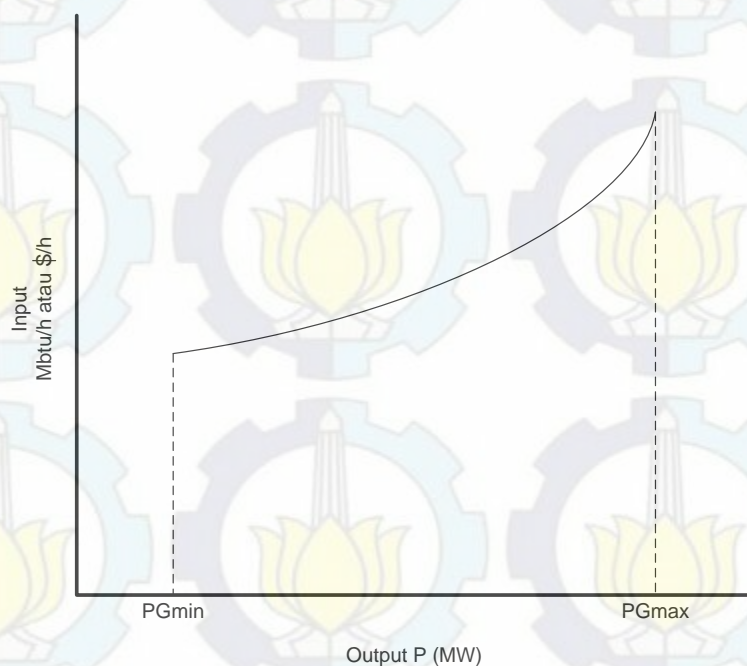
S_{Gi} = daya pembangkitan tiga-fasa yang mengalir ke bus i

S_{Li} = daya beban tiga fasa yang mengalir keluar dari bus i

S_{Ti} = daya yang ditransmisikan tiga-fasa yang mengalir keluar dari bus i

2.2.2 Karakteristik Unit Pembangkit

Tiap-tiap unit pembangkit mempunyai beberapa karakteristik diantaranya adalah input-output pembangkit, karakteristik heat rate, dan karakteristik *increamental heat*. Karakteristik ini dapat diperoleh dari data desain generator dari pabrik pembuat generator dan dari data percobaan. Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan pembangkit termal. Karakteristik pembangkit termal dapat dilihat pada Gambar 2.1. kurva karakteristik input-output dari pembangkit termal menjelaskan hubungan anatar input berupa bahan bakar yang digunakan dan output daya keluaran berupa daya pembangkitan. Input biasanya dinyatakan dalam konsumsi energi (Mbtu/h) atau biaya pembelian bahan bakar (\$/h).



Gambar 2.1 Kurva Input-Output Pembangkit Termal [1]

2.2.3 Batasan kemampuan generator

Generator dalam suatu sistem tenaga listrik memiliki batasan kemampuan operasi, batasan tersebut adalah batasan daya keluaran generator dan batasan laju perubahan daya generator. Batasan keluaran daya generator dinyatakan dalam daya keluaran maksimum (P_{max}) dan daya keluaran minimum (P_{min}). Generator harus dioperasikan dalam rentang P_{min} dan P_{max} untuk mencapai efisiensi pembangkitan dan mencegah kerusakan akibat *over operation*. Apabila generator dioperasikan dibawah P_{min} maka kemungkinan pembangkitan menjadi tidak efisien. Sebaliknya jika generator dioperasikan melebihi P_{max} maka akan terjadi kerusakan fisik generator maupun peralatan lainnya. Ramp rate merupakan batasan laju penambahan maupun pengurangan daya output generator yang menyebabkan biaya pembangkitan menjadi mahal. Besar *ramp rate* tergantung pada jenis unit pembangkit [14] ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Kemampuan *Ramp Rate* Tiap Jenis Pembangkit [14]

Jenis Pembangkit	Ukuran unit (MW)	Ramp rate (%/min)
Nuclear	750-1500	0,2-2
Coal	10-750	0,2-2
Natural gas CT	20-250	3-5
Natural gas CC	40-400	2-3
Hydro power	1-250	100

2.3 Genetic Algorithm (GA)

Genetic Algorithm merupakan sebuah teknik pencarian dengan parameter yang efektif untuk memecahkan masalah optimasi. Metode ini dipertimbangkan ketika teknik optimasi konvensional tidak mencapai kecepatan, akurasi, atau efisiensi yang diinginkan untuk menemukan solusi optimal. GA menjadi salah satu teknik optimasi yang banyak digunakan di berbagai bidang. Pada sistem tenaga, teknik ini digunakan dalam *unit commitment*, *economic dispatch*, *load forecasting*, *reliability studies* dan *various resource allocation problems*.

Berdasarkan teori tersebut kemudian diterapkan dalam algoritma komputasi untuk mencari solusi yang alamiah dari suatu masalah. GA membangkitkan solusi secara acak yang disebut gen. Beberapa gen atau solusi disebut dengan populasi. Setiap solusi dalam populasi mewakili solusi yang mungkin untuk optimasi dan disebut dengan kromosom. Kumpulan dari kromosom akan mengalami crossover dan mutasi yang akan menjadi sebuah generasi. Proses crossover digunakan untuk menggabungkan individu pada suatu generasi. Crossover tergantung pada nilai random dan crossover rate yang telah ditetapkan. Mutasi digunakan untuk mengganti nilai gen dari populasi dengan nilai random yang baru. Proses mutasi bergantung pada nilai mutasi yang telah ditetapkan dari awal. Kromosom dapat berupa nilai biner, numeric, dan real, dan karakter dari suatu permasalahan. Hasil crossover dan mutasi menunjukkan kualitas fitness dari setiap populasi. Nilai fitness yang terbaik

dipilih untuk dijadikan kromosom yang dipertahankan untuk generasi selanjutnya. Proses tersebut berlangsung ketika suatu generasi menghasilkan satu nilai fitness terbaik dan akan dibandingkan dengan fitness dari generasi yang akan dibangkitkan. Genetic Algorithm memiliki beberapa parameter, yaitu :

- Pemilihan Induk
- Crossover
- Mutasi

Pemilihan induk merupakan prosedur yang sederhana dimana dua kromosom dipilih dari populasi induk berdasarkan kebugaran mereka. Solusi dengan nilai fitness tinggi memiliki kemungkinan yang tinggi untuk berkontribusi pada keturunan baru untuk generasi berikutnya [12] menggunakan *roulette-wheel selection*.

Crossover merupakan operator yang paling penting dalam GA. Dalam hal ini crossover bertanggung jawab untuk rekombinasi struktur (pertukaran antara perkawinan kromosom) dan kecepatan konvergensi dari GA biasanya diterapkan dengan kemungkinan yang tinggi (0.6 – 0.9). Kromosom dari dua orang tua dipilih dan digabungkan untuk membentuk kromosom baru yang mewarisi segmen informasi yang disimpan dalam kromosom induk. Sampai saat ini banyak skema crossover seperti *single point*, *multipoint*, *uniform crossover*, dan *non uniform crossover* pada literature [12] yang nantinya akan digunakan dalam tesis.

Langkah-langkah algoritma genetika dapat ditulis sebagai *pseudocode* berikut:

Inisialisasi populasi, N kromosom

Loop

Loop untuk N kromosom

Dekodekan kromosom

Evaluasi kromosm

End

Buat satu atau dua kopi kromosom terbaik

Loop sampai didapatkan N kromosom baru

Pilih dua kromosm

Pindah silang

Mutasi

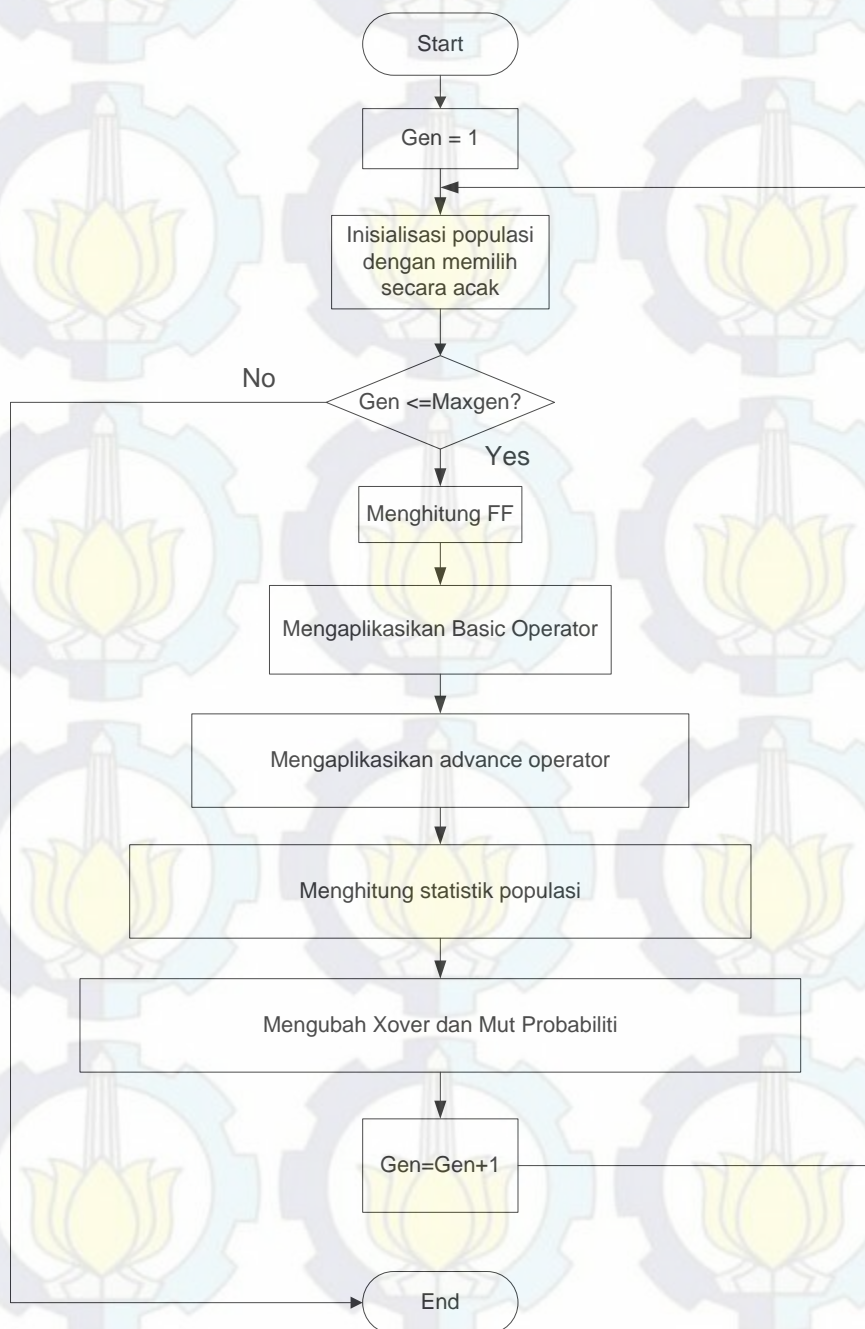
End

End

Pada algoritma di atas digunakan skema penggantian populasi yang disebut sebagai *generational replacement*. Artinya, N kromosom dari satu generasi digantikan sekaligus oleh N kromosom baru hasil pindah silang dan mutasi.

2.4 Enhanced Genetic Algorithm (E-GA)

Skema EGA ditunjukkan pada Gambar 2.2, setelah penerapan dasar operator kontrol (seleksi induk, crossover, dan mutasi) kemudian diterapkan pada permasalahan yang lebih spesifik kemudian diterapkan untuk menghasilkan generasi baru. Semua kromosom pada populasi awal dibuat secara acak (setiap bit dalam kromosom memiliki kemungkinan yang sama dari ON menjadi OFF) [12]. Penambahan yang dilakukan pada E-GA adalah penambahan operator kromosom dan inisialisasi menggunakan QP. Pada inisialisasi awal pemilihan populasi GA tidak dilakukan secara random, melainkan dengan QP yang hasilnya akan digunakan untuk inisialisasi awal. Setelah melakukan proses reproduksi, crossover dan mutasi kemudian di proses lagi menggunakan operator kromosom untuk mendapatkan individu yang lebih baik lagi.



Gambar 2.2 Skema Enhanced Genetic Algorithm

Dari beberapa studi literatur yang diperoleh maka dalam penelitian tesis ini penulis mengajukan metode Enhanced Genetic Algorithm untuk menyelesaikan masalah Dynamic Optimum Power Flow (DOPF) dengan *valve point effect*. Fungsi tujuan meminimalkan biaya bahan bakar, dengan fungsi biaya *non-convex*, mempertimbangkan *valve-point effect* dengan memperhitungkan kerugian saluran transmisi.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Analisis Optimum Power Flow (OPF)

Secara umum permasalahan Optimum power flow dirumuskan secara matematika sebagai berikut [12]:

$$\text{Min } f(x, u) \quad (3.1)$$

$$\text{S. t. } g(x, u) = 0 \quad (3.2)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3.3)$$

$$u \in U \quad (3.4)$$

Dimana:

$$x = [\hat{\theta}^T \ U_L^T]^T \quad (3.5)$$

$$u = [\hat{P}_G^T \ U_T^G \ t^T \ b_{SH}^T]^T \quad (3.6)$$

Equality constraint (3.2) adalah persamaan nonlinier power flow.

Inequality constraint (3.3) adalah fungsi operasional constraint seperti:

1. *Branch flow limits* (MVA, MW atau A);
2. *Load bus voltage magnitude limits*;
3. *Generator reactive capability*;
4. *Slack bus active power output limits*.

Constraint (3.4) mendefinisikan kelayakan permasalahan variabel kontrol seperti:

1. *Unit active power output limits*;
2. *Pembangkitan tegangan bus magnitude limits*;
3. *Transformer-tap setting limits*;
4. *Bus shunt admittance limits*.

Objective function [6] pada OPF dapat di rumuskan sebagai berikut:

1. *Quadratic cost function*

Biaya pembakaran tiap generator dapat dimodelkan sebagai fungsi kuadrat seperti persamaan berikut:

$$f_c = \sum_{i=1}^{N_G} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (3.7)$$

2. *Voltage deviation*

Pada literatur [6] untuk menjaga tegangan deviasi batas biayanya $\pm 5\%$ dari nilai nominal dan dalam 1 p.u. jika memungkinkan. Tegangan deviasi untuk load bus dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$f_{VD} = \sum_{i=1}^{N_{PG}} |V_i - 1| \quad (3.8)$$

3. *Transmission real power losses*

Parameter kontrol untuk mengoptimisasi pada power loss. Rugi daya untuk saluran transmisi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$f_{PL} = \sum_{i=1}^{N_L} g_i [V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.9)$$

4. *Persamaan load flow dan constraint*

Persamaan yang sering digunakan pada load flow adalah $g(x,u)$, pada literatur [6] load flow ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (3.10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (3.11)$$

Dimana, elemen dari matrik bus admitansi direpresentasikan sebagai $|Y_{ij}|$ dan θ_{ij} , n adalah total dari bus.

5. Generator constraint

Tegangan generator, aktif dan reaktif power dapat menggunakan persamaan berikut:

$$V_{Gi}^{\min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (3.12)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (3.13)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, N_g \quad (3.14)$$

6. Ramp Constraint

$$-\delta_i \leq P_{i(t+1)} - P_{it} \leq \delta_i \quad (3.15)$$

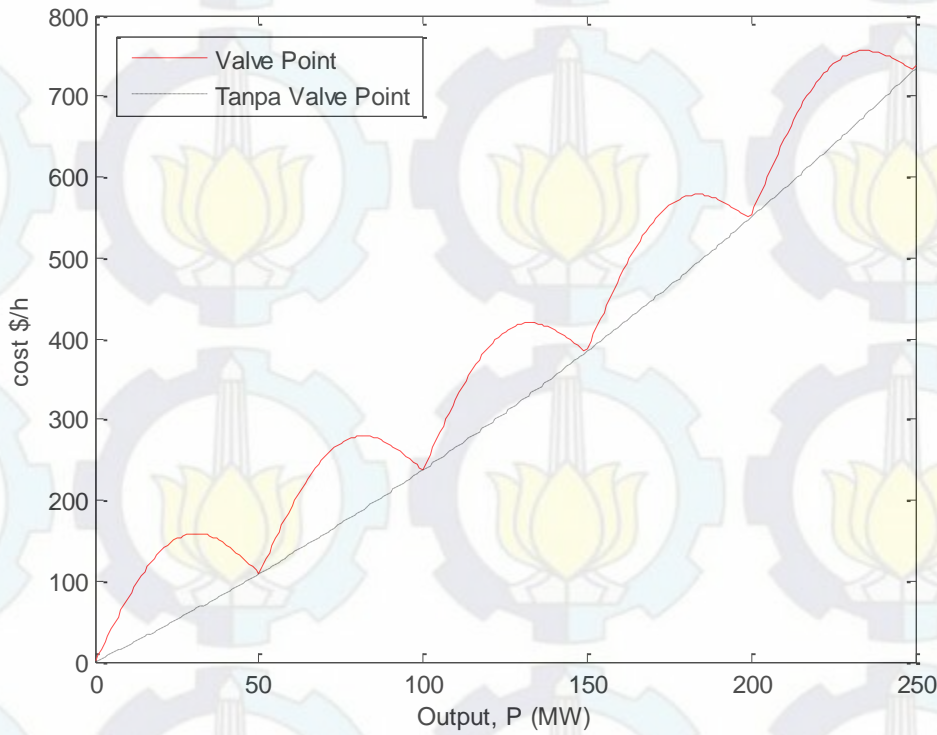
Dari persamaan 3.15 menunjukkan batasan perubahan daya yang dilakukan oleh generator. Batasan tersebut dinamakan *ramp rate*, dimana $-\delta_i$ adalah *ramp limit* dari generator-*i*

3.2 Valve Point Effect

Unit pembangkit dengan turbin uap multi katup memiliki variasi yang besar dalam kurva biaya. Pengaruh dari efek katup ditunjukkan pada Gambar 3.1. pada kurva biaya yang tidak mulus, fungsi sinusoidal ditambahkan pada fungsi kuadrat kurva biaya tersebut. Fungsi sinusoidal tersebut muncul akibat pembukaan katup uap untuk mengatasi perubahan beban. Kenaikan fungsi biaya dari unit pembangkit dengan efek katup dapat direpresentasikan pada persamaan 3.16 [9].

$$F_i(P_{i,t}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 + \left| e_i \sin \left(f_i x (P_{Gi}^{\min} - P_{i,t}^t) \right) \right| \quad (3.16)$$

Dimana e_i dan f_i adalah koefisien fungsi biaya yang disebabkan oleh efek dari pembukaan katup bahan bakar, sedangkan P_{Gi}^{\min} merupakan pembangkitan minimum dari generator ke-*i*.



Gambar 3.1 Kurva Biaya Bahan Bakar Non-Smooth

3.3 Inisialisasi dan Representasi Populasi GA pada DOPF

Kromosom dari GA dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$x_j = [P_1^1, P_2^1 \dots P_{NT}^1, P_1^2, P_2^2 \dots P_{NT}^2, \dots P_1^T, P_2^T \dots P_{NT}^T] \quad (3.17)$$

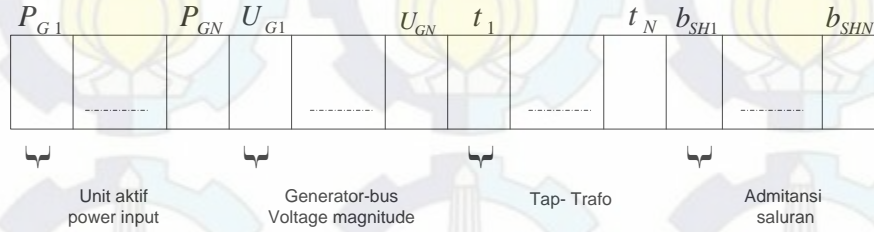
Dimana $P_i^t = P_{GTi,t}, \forall i, t$ dan $j = \in N_D$. N_D adalah nomor populasi, dan banyaknya variabel untuk permasalahan OPF adalah $N_x = T \times N_T$.

Pada umumnya, populasi GA dibangkitkan secara acak, namun dalam hal ini pembentukan populasi awal menggunakan *Quadratic Programming* (QP) untuk nilai awal inisialisasi. Tujuan dari pemilihan inisialisasi awal menggunakan QP adalah agar inisialisasi awal tidak random dan mendekati nilai yang telah dihitung oleh QP. Permasalahan OPF memiliki banyak *equality constraint*, individu dalam populasi awal dihasilkan dengan persamaan (3.18).

$$x_{i,j} = x_i^{min} + (x_i^{max} - x_i^{min}) \text{ihdesign}(1, N_x) \quad (3.18)$$

$i \in N_x \text{ dan } j = 1 \dots N_D$

Dimana x^{min} dan x^{max} adalah upper dan lower bound setiap variabel yang telah ditentukan dari masing-masing pembangkit tersebut. Sedangkan struktur kromosom dapat ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Struktur kromosom GA

3.4 Inisialisasi EGA menggunakan Qudratic Programming

Quadratic Programming (QP) adalah metode konvensional untuk menyelesaikan masalah yang memiliki fungsi objektif kuadrat dan linear constraint, QP sangat efektif untuk menemukan global minimum. Model matematis QP ditunjukkan pada persamaan (3.19)

$$f(x) = \frac{1}{2}x^T Bx - x^T b \quad (3.19a)$$

$$x \in \mathbb{R}^n \quad (3.19b)$$

$$\begin{aligned} A_1 x &= c \\ A_2 x &\leq d, \end{aligned} \quad (3.19c)$$

Dimana $B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ adalah simetris, $A_1 \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $A_2 \in \mathbb{R}^{q \times n}$ dan $b \in \mathbb{R}^n$, $c \in \mathbb{R}^m$, $d \in \mathbb{R}^p$

3.4.1 Equaity constraint quadratic programming

QP memiliki batasan equality dan inequality, dari persamaan (3.19b) dan (3.19c) disederhanakan menjadi:

$$\text{minimize } f(x) = \frac{1}{2}x^T Bx - x^T b \quad (3.20a)$$

$$\text{over } x \in \mathbb{R}^n \quad (3.20b)$$

$$\text{subject to } Ax = c \quad (3.20c)$$

Dimana $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $m \leq n$. Untuk A diasumsikan sebagai baris m . Untuk kondisi $x^* \in \mathbb{R}^n$ dari persamaan (3.20b) dan (3.20c) menggunakan 22ontro linier

$$\underbrace{\begin{pmatrix} B & A^T \\ A & 0 \end{pmatrix}}_{=:K} \begin{pmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ b \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Dimana $\lambda^* \in \mathbb{R}^m$ adalah fungsi lagrange multiplier.

Langkah-langkah mencari nilai P1,P2,P3.....Pn menggunakan QP:

Langkah 1) membuat fungsi objektif *economic dispatch* menjadi fungsi kuadrat QP, ditunjukkan pada persamaan (3.22):

$$F_i(P_i) = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (3.22)$$

Langkah 2) memodelkan matrix H didefinisikan menjadi fungsi kuadrat. Manipulasi matrik menjadi $[1 : m \times n]$, dimana m adalah total beban (*jam*) dan n adalah total generator, contoh total generator 2 maka, $m = 2$

$$[a_1 \quad \cdots \quad a_n a_1 \quad \cdots \quad a_n] \quad (3.23)$$

$$H = 2 * \text{diag}[a_1 \quad \cdots \quad a_n a_1 \quad \cdots \quad a_n] \quad (3.24)$$

$$H = 2 * \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_n \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Langkah 3) Memodelkan vector F sebagai linier, menjadi fungsi biaya:

$$F = [b_1 \quad \cdots \quad b_n b_1 \quad \cdots \quad b_n] \quad (3.26)$$

Langkah 4) Memodelkan matrix A dan b pada inequality constraint $A * x \leq b$

Langkah 5) memodelkan matrix A_{eq} and B_{eq} pada equality constraint $A_{eq} * x = b_{eq}$ menjadi persamaan (3.27). Matrix A_{eq} dimodelkan menjadi $[m : (m - 1) \times n]$ dan $B_{eq} [1:m]$. Contoh $n = 3$, $m = 2$ sehingga menjadi :

$$A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$Beq = [P_{load (1)} \quad P_{load (2)}] \quad (3.28)$$

$$Aeq*x = beq \quad (3.29)$$

Langkah 6) Memodelkan lb dan ub, di definisikan menjadi batas atas batas bawah. $Ub [1: m \times n]$ dan $lb [1: m \times n]$

$$ub = [P_{max} \quad P_{max} \quad P_{max} \quad P_{max} \quad P_{max} \quad P_{max}] \quad (3.30)$$

$$ub = [P_{min} \quad P_{min} \quad P_{min} \quad P_{min} \quad P_{min} \quad P_{min}] \quad (3.31)$$

Langkah 7) Inisialisasi EGA dengan menggunakan output dari QP menjadi $Y = X \pm rand*K$, dima K adalah konstanta yang nilainya adalah minimum X dari QP.

3.5 Pengkodean kromosom

Kromosom yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 terdiri atas empat kromosom, masing-masing kromosom didefinisikan sebagai 1) P_G ; 2) U_G ; 3) t dan 4) b_{SH} . Pengkodean dilakukan menggunakan panjang gen yang berbeda untuk masing-masing variabel kontrol, tergantung dengan ketepatan akurasi yang diinginkan. Pengkodean kromosom dapat diformulasikan sebagai berikut:

- 1) Variabel kontrol kontinyu mengambil nilai dalam interval $[u_i^{min}, u_i^{max}]$

$$u_i = u_i^{min} + (u_i^{max} - u_i^{min}) \cdot \frac{k}{2^{N_{ui}-1}} \quad (3.32)$$

- 2) Variabel kontrol diskrit menggunakan M dengan nilai $u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^M$

$$u_i = u_i^m \text{ dimana } m = \text{int} \left[\frac{M}{2^{N_{ui}}} \cdot k + 1.5 \right] \quad (3.33)$$

Dan,

$$\log_2 M \leq N_{ui} \leq \log_2 M + 1 \quad (3.34)$$

Dimana k adalah bilangan variabel yang di dekodekan dalam bentuk biner, dan N_{ui} adalah panjang gen (jumlah bit) yang digunakan untuk pengkodean variabel kontrol u_i .

3.6 Fitness Function

GA biasanya dirancang sedemikian rupa sehingga memaksimalkan Fitness Function (FF), dimana nantinya digunakan sebagai ukuran kualitas setiap

kandidat solusi. Tujuan dari OPF adalah untuk meminimalkan total biaya pembangkitan, oleh karena itu diperlukan transformasi untuk mengubah fungsi objective OPF ke FF yang sesuai, untuk dimaksimalkan oleh GA. Batasan OPF (3.3) sebagai *objective function* GA, dengan menambahkan variabel kontrol untuk kontrol batasan jika melebihi batasan yang telah ditentukan. Batasan pada variabel kontrol (3.4) secara otomatis dapat terpenuhi oleh pemilihan pengkodean yang dipilih pada persamaan (3.32) dan (3.34). FF GA dapat dituliskan dalam persamaan :

$$FF = \frac{A}{\sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) + \sum_{i=1}^{N_C} w_j \cdot Pen_j} \quad (3.21)$$

$$Pen_j = |h_j(x, u)| \cdot H(h_j(x, u)) \quad (3.22)$$

Dimana:

FF : Fitness function

A : konstan

$F_i(P_{Gi})$: fungsi biaya tiap unit I

w_j : pembobot pada fungsi konstrain j

Pen_j : fungsi variabel kontrol untuk fungsi konstrain j

$h_j(x, u)$: pelanggaran terhadap j th fungsi konstrain, jika positif

$H(.)$: fungsi Heaviside (langkah)

N_G : nomor setiap unit

N_C : nomor dari fungsi konstrain

Dengan adanya solusi kandidat untuk masalah tersebut, diwakili oleh kromosom, FF dapat dihitung sebagai berikut:

- 1) Dekodekan kromosom untuk menentukan variabel kontrol, dengan menggunakan persamaan (3.32) dan (3.34). Variabel kontrol yang dihitung berdasarkan persamaan (3.4)
- 2) Selesaikan power flow (3.2), untuk menghitung nilai x .
- 3) Menentukan batasan fungsional yang dilanggar (3.3) dan menghitung fungsi (3.22)
- 4) Menghitung fungsi FF dengan (3.21)

Dalam langkah ke-2 metode aliran daya yang digunakan adalah Newton-Rhapson. Dimana tanpa menggunakan switching tipe PV-PQ bus, karena kemampuan reaktif generator digabungkan dalam fungsi operasi konstrain dan tidak ada penyesuaian variabel, seperti tap trafo dan kapasitas shunt. Hal tersebut tidak dilakukan karena dalam hal ini pengaturan kontrol telah dilakukan oleh GA. Sehingga, iterasi pada aliran daya lebih cepat untuk konvergen.

3.7 Seleksi

Proses seleksi dilakukan dengan memilih acak berbobot (*Weighted Roulette Wheel*). Dari semua kromosom dengan nilai fitness masing-masing, kemudian dibuat sistem pemilih acak berbobot. Kromosom dengan nilai fitness besar mempunyai bobot yang besar, sedangkan kromosom dengan nilai fitness kecil mempunyai bobot yang kecil. Total presentase semua nilai fitness sama denan 100%. Kromosom dengan nilai yang besar, bobotnya menjadi besar sehingga sektornya akan lebih lebar pada *Roulette Wheel*. Sehingga, probabilitas terpilihnya menjadi lebih besar. *Weighted Roulette Wheel* kemudian diputar sebanyak M kali sehingga akan menghasilkan M buah kromosom yang baru. Nilai M adalah banyaknya kromosom dalam suatu populasi. Dalam setiap populasi dimungkinkan terdapat kromosom-kromosom yang sama.

3.8 Pindah silang

Pindah silang dilakukan untuk menghindari terjadinya konvergensi dini. Setiap kromosom akan memilih pasangannya untuk dilakukan pindah silang secara acak. Frekuensi operator pindah silang dikendalikan oleh nilai P_c . Dalam setiap populasi, sebanyak $P_c \times \text{population_size}$, struktur melakukan *crossover*. Semakin tinggi nilai probabilitas pindah silang, maka semakin cepat struktur baru diperkenalkan dalam populasi. Probabilitas pindah silang yang sering digunakan umumnya berkisar 0.6 sampai 0.95.

Dalam penelitian ini probabilitas P_c yang digunakan adalah 0.8. pindah silang dilakukan mulai digit ke I sampai digit terakhir. Dengan I adalah bilangan acak mulai dari 0 sampai dengan $k-1$. Dengan k adalah banyaknya gen.

3.9 Mutasi

Operasi mutasi digunakan untuk melakukan modifikasi satu atau lebih nilai gen dalam kromosom yang sama. Mutasi memastikan bahwa probabilitas untuk pencarian pada daerah tertentu dalam persoalan tidak akan pernah nol dan mencegah kehilangan total materi genetika setelah pemilihan dan penghapusan. Mutasi dilakukan secara acak pada gen dengan probabilitas yang kecil. Pada penelitian ini probabilitas mutasi adalah $P_m = 0.3$. proses berulang dari awal untuk populasi yang baru.

3.10 Enhanced Genetic Algorithm

Enhanced Genetic Algorithm (E-GA) ditunjukkan pada Gambar 2.1, setelah penerapan dasar operator seperti seleksi orang tua, crossover dan mutasi langkah selanjutnya adalah menambahkan beberapa operator tambahan seperti berikut:

1. *Fitness scaling*

Untuk menghindari dominasi awal yang menyebabkan persaingan sehat diantara yang paling bugar, maka diperlukan penskalaan terhadap kebugaran populasi. Dalam penelitian ini pendekatan kebugaran diperkecil dengan menggunakan transformasi linier.

2. *Elitisme*

Elitism memastikan bahwa solusi terbaik yang telah ditemukan tidak pernah hilang saat berpindah dari satu generasi ke generasi lainnya. Sehingga individu terbaik dalam populasi disimpan pada generasi berikutnya.

3. *Hill Climbing*

Hill climbing digunakan untuk meningkatkan kecepatan pencarian GA di area yang mulus dari ruang pencarian. Kromosom yang dimodifikasi diterima jika terdapat peningkatan nilai FF, jika tidak maka kromosom lama tidak berubah. Operator ini hanya berlaku untuk kromosom terbaik (elit) pada setiap generasi.

3.11 Modifikasi operator kromosom

1. *Gene Swap Operator (GSO)*

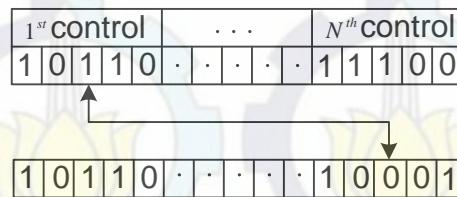
Operator ini secara acak memilih dua gen dalam kromosom dan menukar nilainya, yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 operator ini menukar nilai dari daya aktif output dua unit, besarnya tegangan dua bus, dan sebagainya. Dalam hal ini jenis kromosom yang berbeda tidak bisa bertukar, sehingga hanya kromosom yang sama yang dapat bertukar.



Gambar 3.3 Gene Swap Operator

2. *Gene Cross-Swap Operator (GCSO)*

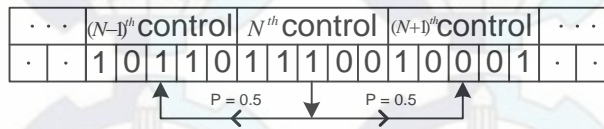
GCSO adalah variasi dari *GSO*. *GCSO* memilih secara acak dua kromosom yang berbeda dari populasi dan dua gen, satu dari setiap kromosom yang dipilih, dan menukar nilai dari kromosom tersebut. *GCSO* dapat ditunjukkan pada Gambar 3.4 ketika *crossover* kromosom dengan kebugaran yang tinggi, *GCSO* untuk mencari nilai alel yaitu memanfaatkan informasi yang tersimpan dalam string dengan kebugaran yang rendah.



Gambar 3.4 Gene Cross-Swap Operator

3. *Gene Copy Operator*

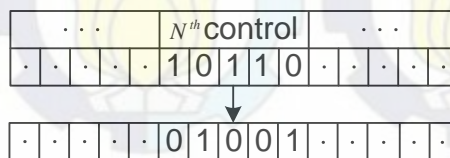
Operator ini secara acak memilih satu gen dalam kromosom dan dengan probabilitas yang sama menyalin nilai ke pendahulunya atau penerusnya. Gen dengan tipe control yang sama, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5 operator ini sering digunakan, misalnya untuk unit bus yang karakteristiknya sama untuk beroperasi pada output yang sama.



Gambar 3.5 Gene Copy Operator

4. *Gene Inverse Operator (GIO)*

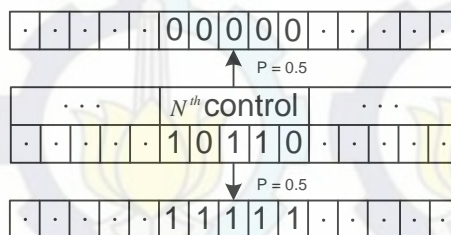
Operator ini seperti mutasi, yaitu secara acak memilih satu gen dalam kromosom dan membalikkan nilai bitnya dari satu ke nol atau sebaliknya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6 GIO mencari peningkatan kinerja dengan memanfaatkan area baru dari pencarian yang jauh dari solusi, dan mempertahankan keragaman populasi.



Gambar 3.6 Gen Inverse Operator

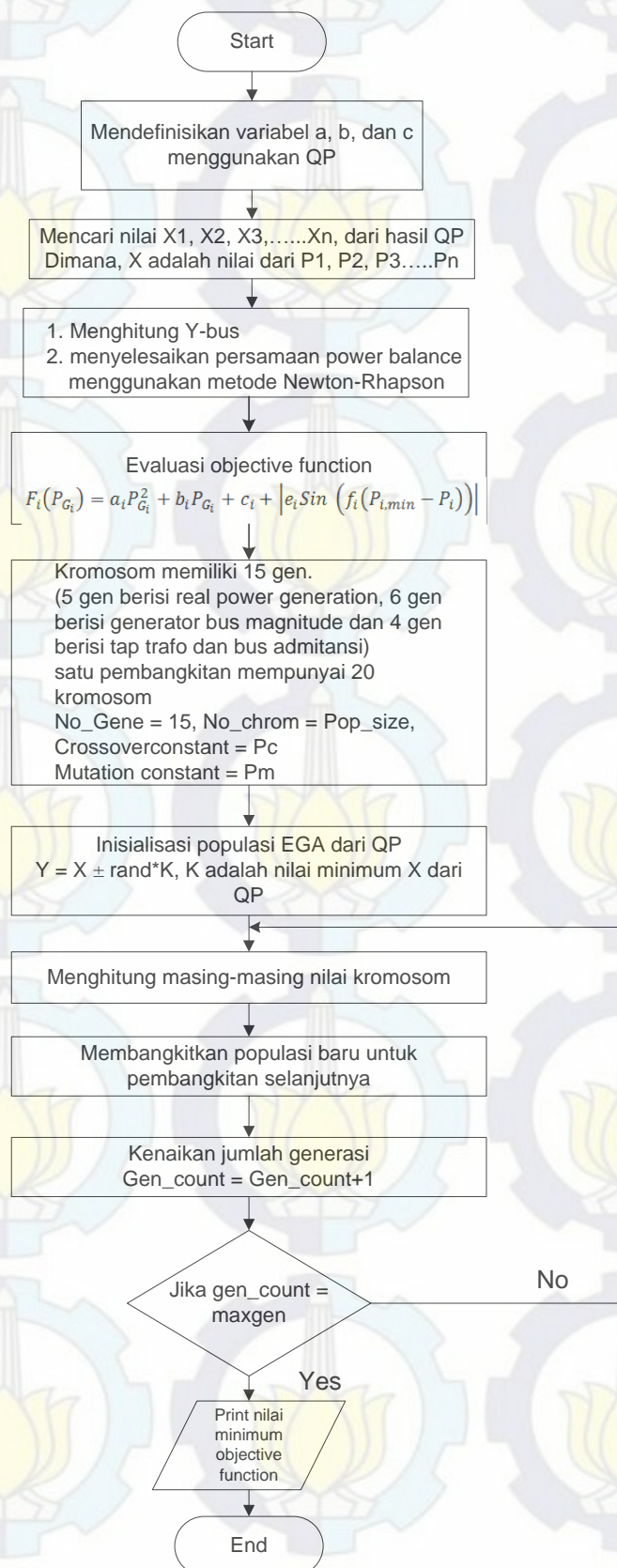
5. *Gene Max-Min Operator (GMMO)*

GMMO mengidentifikasi variabel kontrol batas atas dan batas bawah. GMMO memilih gen acak dalam kromosom dengan probabilitas yang sama (0,5), mengisi daerahnya dengan 1 atau 0, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Gene Max-Min Operator

Tahapan pengerjaan penyelesaian *dynamic optimum power flow* menggunakan EGA ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Alur pengerjaan DOPF menggunakan EGA



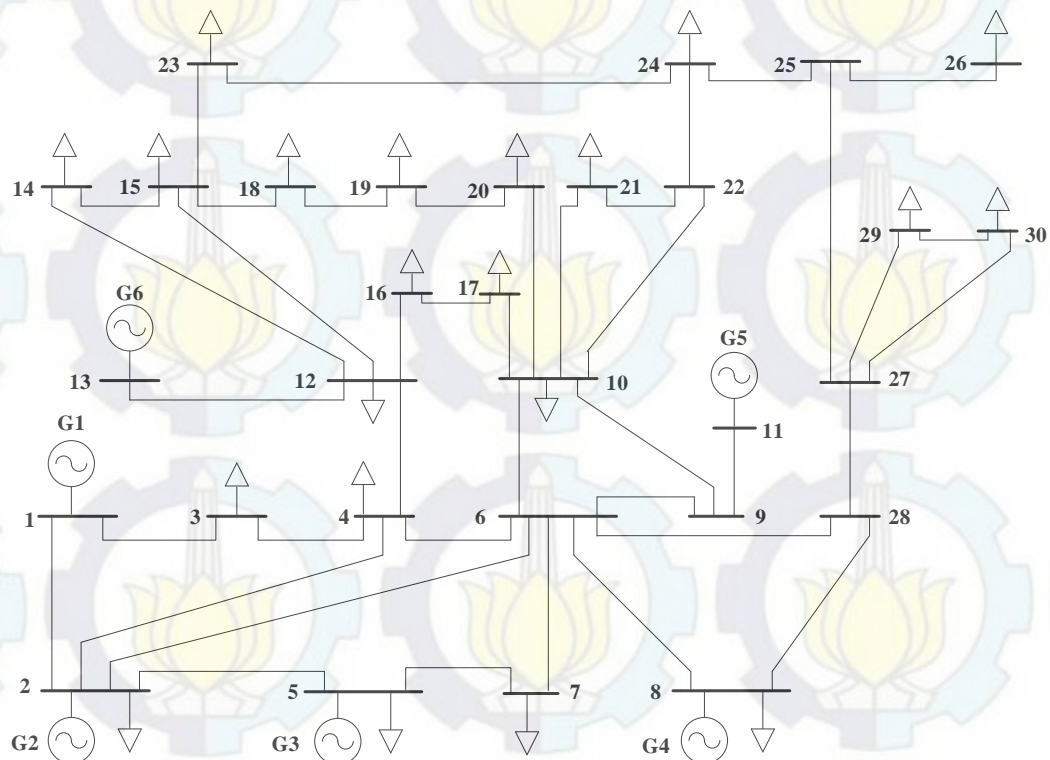
Halaman Ini Sengaja di kosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi dan analisis akan dibahas pada bab ini. Sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah IEEE 30 bus yang terdiri dari 30 bus, dengan 41 saluran dan 6 pembangkit. Gambar 4.1 menunjukkan diagram satu garis IEEE 30 Bus, yang nantinya akan di simulasikan menggunakan EGA menggunakan inisialisasi QP dan penambahan operator koromosom dan EGA dengan penambahan PSO dan Fuzzy, kemudian dibandingkan performa mana yang lebih baik. Simulasi pertama tanpa menggunakan efek *valve-point* untuk perhitungan *dynamic optimum power flow* dengan EGA menggunakan inisialisasi QP dengan penambahan operator koromosom dan EGA dengan penambahan PSO dan Fuzzy. Simulasi kedua menggunakan efek *valve-point* dengan metode yang sama dengan simulasi sebelumnya.

Hasil dari simulasi yang ditampilkan meliputi data tegangan, daya terbangkitkan, dan total biaya yang dihasilkan.

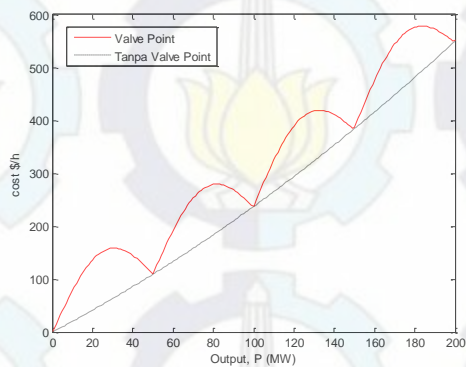


Gambar 4.1 Diagram Satu Garis IEEE 30 Bus

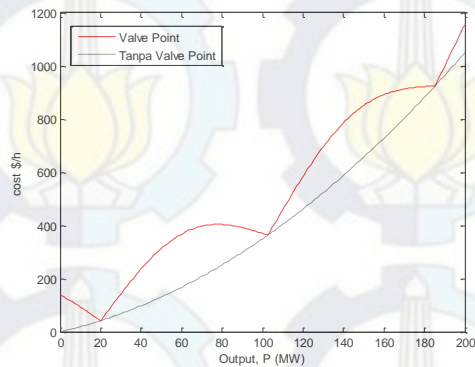
Sistem IEEE 30 bus memiliki beberapa tipe pembangkit yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Kurva karakteristik *valve point effect* masing-masing pembangkit ditunjukkan pada Gambar 4.2. (a), (b), (c), (d), (e), dan (f)

Tabel 4.1 Data Pembangkit IEEE 30 Bus [13]

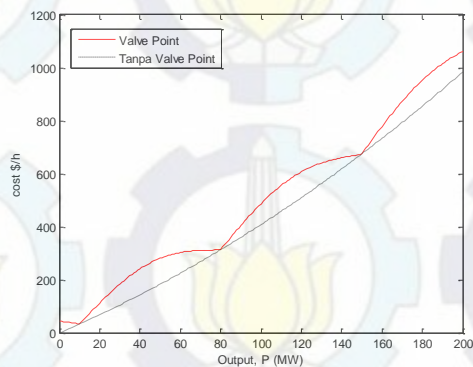
Tipe Pembangkit	Bus	P_{\min}	P_{\max}	Koefisien Biaya Pembangkitan					Ram rate (up)	Ram rate (down)
				a	b	c	e	f		
Batu bara	1	50	200	0	2	0,00375	18	0,037	15	20
Batu bara	2	20	80	0	1,75	0,0175	16	0,038	10	15
Batu bara	5	15	50	0	1	0,0625	14	0,04	6	10
Gas	8	10	55	0	3.25	0,00834	12	0,045	4	8
Gas	11	10	30	0	3	0,025	13	0,042	4	8
Minyak	13	12	40	0	3	0,025	13,25	0,041	5	10



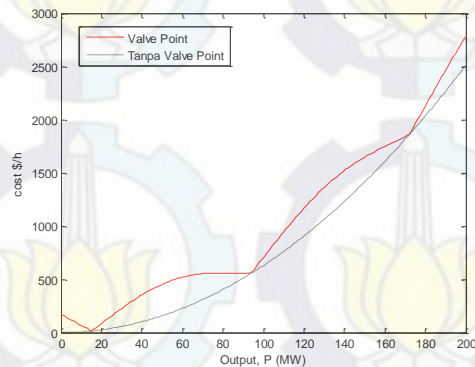
(a)



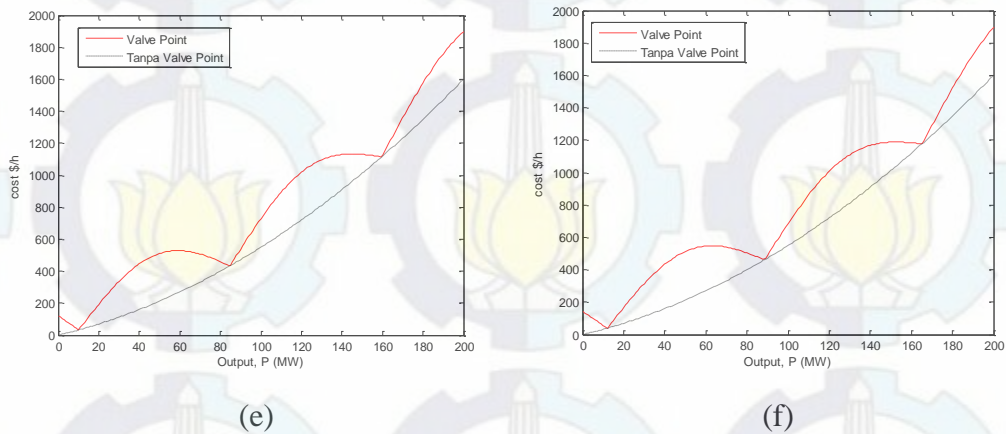
(b)



(c)



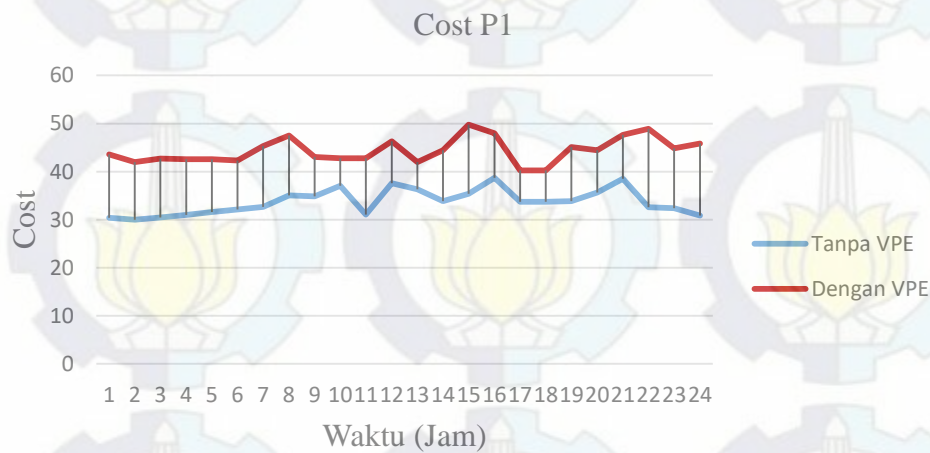
(d)



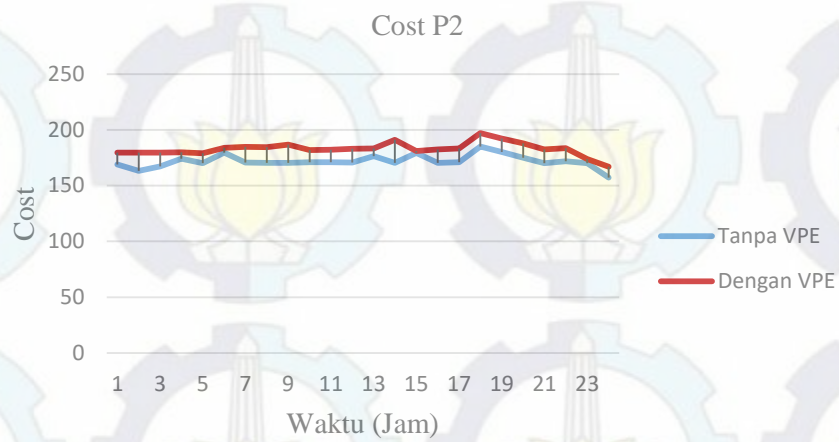
Gambar 4.2 Karakteristik Kurva VPE masing-masing pembangkit (a) Pembangkit 1, (b) Pembangkit 2, (c) Pembangkit 3, (d) Pembangkit 4 , (e) Pembangkit 5, (f) Pembangkit 6

4.1 Simulasi 1

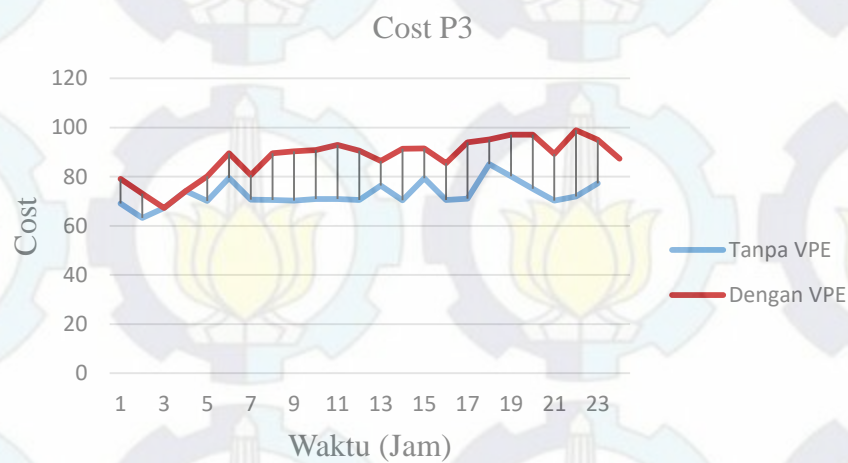
Hasil simulasi pertama menunjukkan data tegangan dapat dilihat pada lampiran Tabel 1, daya terbangkitkan dan total biaya yang dihasilkan tanpa efek *valve-point* menggunakan EGA-QP dan EGA-PSO dapat dilihat pada lampiran Tabel 2. Jumlah pembangkitan selama 24 jam telah memenuhi permintaan beban serta tidak melanggar ramp-rate yang telah ditentukan. Biaya yang dibutuhkan untuk membangkitkan daya selama 24 jam masing-masing pembangkit ditunjukkan pada Gambar 4.3 (a), (b), (c), (d), (e), dan (f), sedangkan total biaya yang diperlukan untuk membangkitkan daya selama 24 jam ditunjukkan pada Gambar 4.4



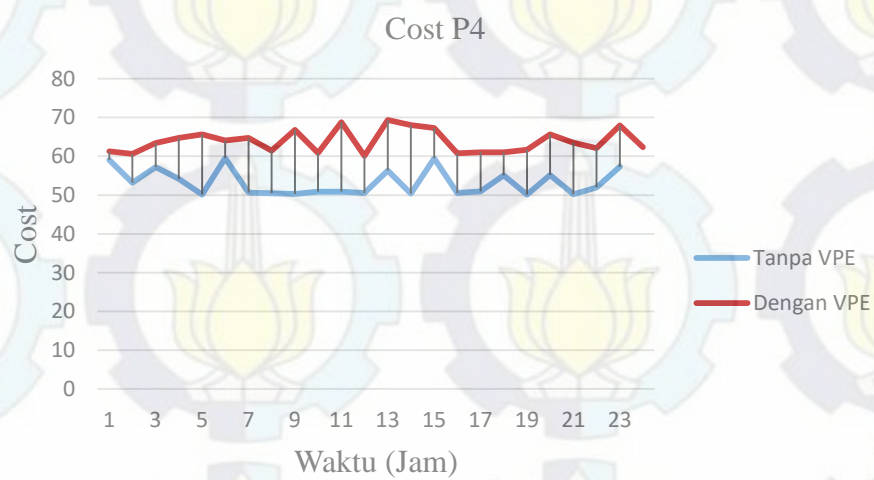
Gambar 4.3 (a) Biaya pada Pembangkit 1



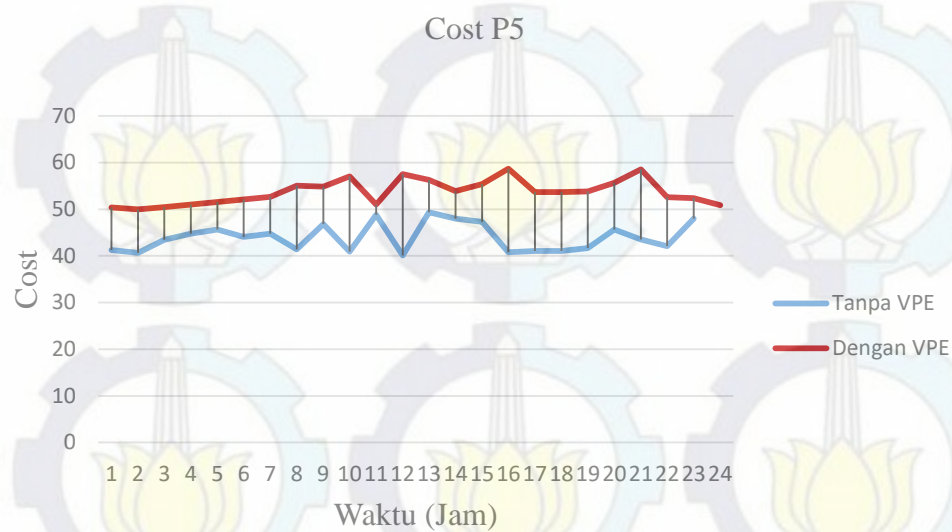
Gambar 4.3 (b) Biaya pada Pembangkit 2



Gambar 4.3 (c) Biaya pada Pembangkit 3



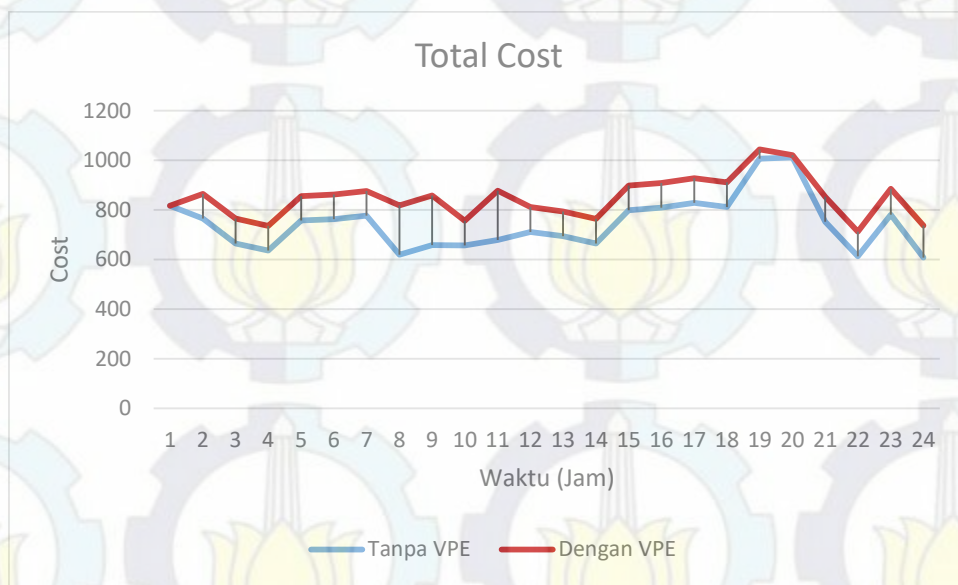
Gambar 4.3 (d) Biaya pada Pembangkit 4



Gambar 4.3 (e) Biaya pada Pembangkit 5

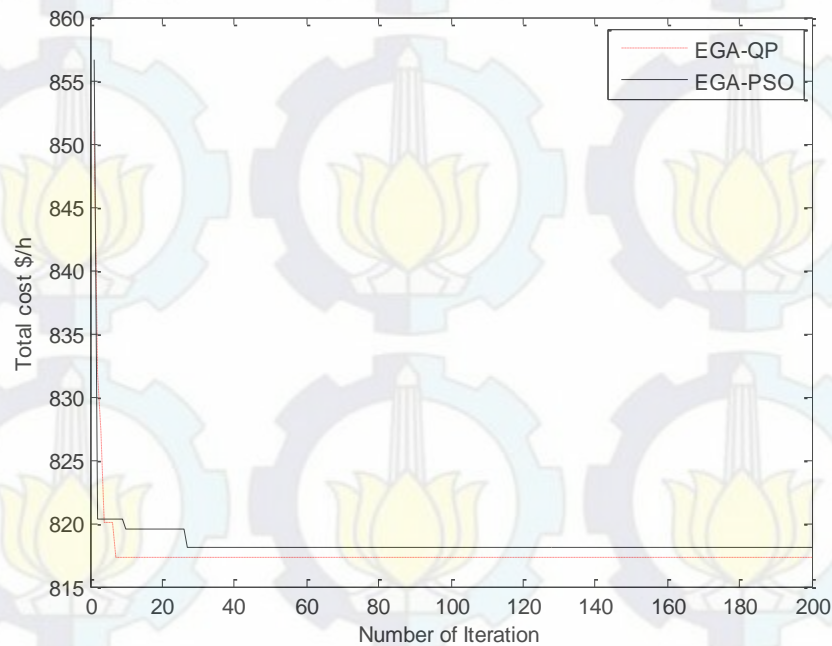


Gambar 4.3 (f) Biaya pada Pembangkit 6



Gambar 4.4 Total Biaya selama 24 Jam dengan VPE dan tanpa VPE

Gambar 4.4 merupakan hasil biaya selama 24 jam dengan *valve point effect* dan tanpa *valve point effect*, menggunakan EGA-QP. Dapat di lihat bahwa adanya *valve point effect* biaya yang dibutuhkan untuk membangkitkan daya selama 24 jam menjadi lebih mahal, hal ini dikarenakan kebutuhan akan daya semakin besar, sehingga memerlukan bahan bakar yang banyak. Daya terbangkitkan selama 24 jam menggunakan EGA-PSO dan EGA-QP tanpa Valve point Effect berturut turut dapat dilihat pada lampiran Tabel 3 dan Tabel 4. pada Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan pembangkitan tiap jam telah memenuhi batasan ramp rate, hal ini membuktikan bahwa program EGA-PSO dan EGA-QP dapat menyelesaikan OPF, tanpa melanggar batasan *ramp rate* yang telah ditentukan. Biaya yang di hasilkan menggunakan EGA-QP untuk memenuhi pembangkitan selama 24 jam lebih murah jika dibandingkan dengan EGA-PSO. Biaya pembangkitan EGA-QP lebih murah hal ini di karenakan proses penambahan inisialisasi populasi menggunakan QP dan penambahan operator kromosom sehingga di dapat individu terbaik yang menghasilkan nilai yang minimum. Sedangkan pada EGA-PSO karena inisialisasi awal random kemudian dikerjakan lagi menggunakan Fuzzy sehingga konvergensinya lebih lama, selain itu biaya nya juga lebih mahal. Grafik konvergensi EGA-QP dan EGA-PSO ditunjukkan pada Gambar 4.5.



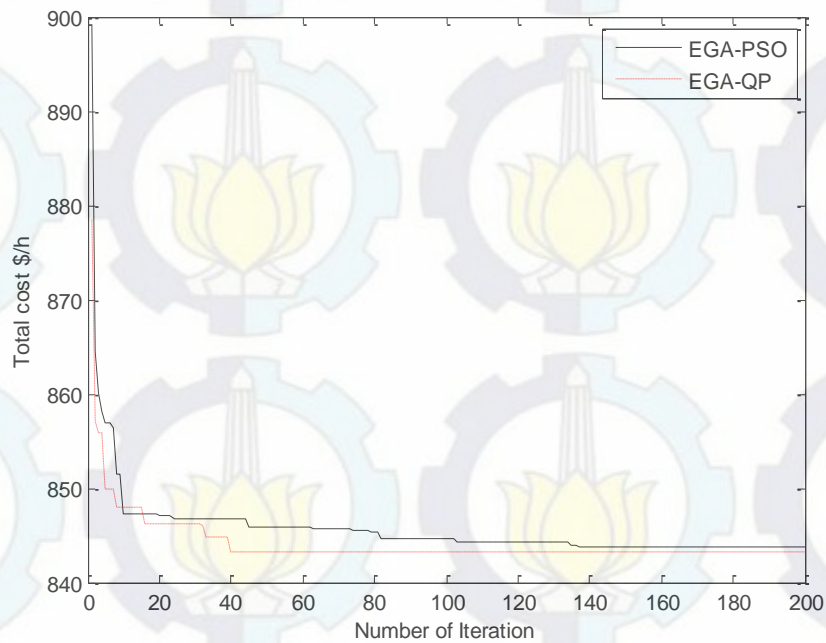
Gambar 4.5 Grafik konvergensi EGA-PSO dan EGA-QP tanpa Valve Point Effect

Gambar 4.5 terlihat bahwa EGA-QP mencapai titik konvergensi pada iterasi ke 15, dengan waktu yang diperlukan untuk konvergen adalah 487.79 sekon dan biaya yang dihasilkan lebih minimum dibandingkan dengan EGA-PSO yang konvergen pada iterasi ke 35 dengan waktu yang diperlukan adalah 649.40 sekon.

4.2 Simulasi 2

Pada simulasi 2 menunjukkan hasil penerapan EGA-QP dan EGA-PSO menggunakan *valve point effect*. Daya yang terbangkitkan selama 24 jam menggunakan EGA-PSO dengan *valve point effect* ditunjukkan pada lampiran Tabel 4 Sedangkan Tabel 5 menunjukkan daya terbangkitkan menggunakan EGA-QP dengan *valve point effect*. EGA-QP dengan *valve point effect* menghasilkan biaya lebih murah dibandingkan dengan EGA-PSO. Dengan penambahan *valve point effect* biaya yang dihasilkan lebih mahal dibandingkan tanpa menggunakan *valve point effect*, hal ini disebabkan karena *valve point effect* mempertimbangkan efek buka tutup katup untuk memenuhi permintaan beban yang tinggi.

Kurva konvergensi EGA-QP dan EGA-PSO menggunakan *valve point effect* ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik konvergensi EGA-QP dan EGA-PSO dengan *Valve Point Effect*

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa EGA-QP dengan *Valve Point Effect* biayanya lebih murah dibandingkan dengan EGA-PSO. Waktu yang diperlukan EGA-QP untuk konvergen adalah 587.79 sekon, lebih cepat dibandingkan EGA-PSO dengan waktu yang diperlukan untuk konvergen adalah 738.33 sekon. Rata-rata biaya pembangkitan antara EGA-QP dan EGA-PSO dengan 20 kali percobaan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rata-rata total biaya dengan 20 kali Percobaan

	Terendah (\$)	Tertinggi (\$)	Rata-rata (\$)	STDEV
EGA-QP Tanpa Valve	802,05	803,7	802,358	0,362
EGA-PSO Tanpa Valve	805,01	807,94	805,548	0,651
EGA-QP Dengan Valve	842,88	844,99	843,944	0,536
EGA-PSO Dengan Valve	843,05	845,91	844,416	1,074

BAB 5

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi yang diperoleh maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :


1. Dynamic Optimum power flow dapat diselesaikan menggunakan EGA-QP.
2. EGA-QP biaya yang dihasilkan lebih murah dibandingkan dengan *Genetic Algorithm* dengan total biaya pembangkitan yang diperoleh EGA-PSO tanpa valve poin effect adalah sebesar 19317,00 USD sedangkan EGA-PSO 19403,02 USD selama 24 jam. Sedangkan dengan *valve point effect* total biaya yang diperoleh EGA-QP adalah sebesar 19958,85 USD dan EGA-PSO sebesar 20269,55 USD selama 24 jam.
3. Dengan menggunakan EGA-QP tingkat konvergensinya lebih cepat dengan waktu yang diperlukan adalah 487.79 sekon sedangkan EGA-PSO waktu yang diperlukan untuk konvergen adalah 649.40 sekon



Halaman ini sengaja di kosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.J. Wood.,Wollenberg, Bruce F.,Sheble, Gerald B.,*"Power Generation, Operation and Control"*, John Wiley & sons, Inc., Hoboken, New Jersey Third edition, 2012.
- [2] Zaman, M.F., Elsayed, Saber M., Ray, Tapabrata., and Sarker, A. Ruhul.,*"Evolutionary Algorithm for Dynamic Economic Dispatch"*,IEEE Trans on Power Syst., vol.31. No 2, pp 1486-1494, Maret, 2016.
- [3] D.C. Walter and G.B. Sheble.,*"Genetic Algorithm Solution Of Economic Dispatch with Valve Point Loading"*,IEEE Trans on Power Syst., vol. 8. no 3, pp.1352-1332, Agustus, 1993.
- [4] Mota-Palomino R, Quintana VH.,*"Sparse Reactive power scheduling by A Penalty-Function Linier Programming technique"*, IEEE Trans on Power System. 1(3) : 31-39, 1986.
- [5] Burchet RC, Happ HH, Vierath DR.,*"Quadratically Convergent Optimal Power Flow"*,IEEE Trans on Power System.PS;103 (11) :3267-76. 1984
- [6] Abaci, Kabir and Yamacli Volkan.,*" Differential Search Algorithm for Solving Multi-Objective Optimal Power Flow"*, Science Direct on Electrical Power & Energi System., 79, 1-10, December, 2016.
- [7] Sivasubramani S, Swarup K.S.,*" Sequential Quadratic Programming Based Diferential Evolution Algorithm for Optimial Power Flow Problem"*, IET Generation on Transmision & Distribution. Vol 5, Iss. 11, pp 1149-1154, May 2011.
- [8] Yuryevic, Jason and Wong Po Kit.,*"Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm"*,IEEE Trans on Power System, Vol. 14, No 4, November,1999.
- [9] Kumari M.Salaiya.,*"Enhanced Genetic Algorithm Based Computation Technique For Multiobjective Power Flow"* Science Direct on Electrical Power and Energy Systems (32), 736-742. 2010.
- [10] Storn, R. and Price, K.,*"Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic For Global Optimization Over Continuous Spaces"*, on Jurnal global optimization, 11, pp. 341-359, 1997.
- [11] Wang, M.Q., Gooi, H.B., Chen S.X., and Lu. S., *"A Mixed Integer Quadratic Programming For Dynamic Economic Dispatch With Valve Point Effect"*, IEEE Trans on Power System, Vol. 29, No 5, September, 2014.

- 
- [12] Bakirtzis, Anastasios .G., Biskas, Pandel N., Zoumas, Christoforos .E., Petridis, Vasilios., "*Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm*", IEEE Trans on Power System, Vol. 17, No 2, May, 2002
- [13] T.Niknam, M.R. Narimani, J.Aghaei, S. Tabatabaei, M. Nayeripour., "*Modified Honey Bee Mating Optimisation to Solve Dynamic Optimal Power Flow Considering Generation Constraints*", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 5 Iss. 10, pp. 989-1002, June, 2011
- [14] R.S. Wibowo, Nursidi, I. Satriyadi, DF Uman, A. Soeprijanto, O. Penangsang, "*Dynamic DC optimal power flow using quadratic programming*," in Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2013.

LAMPIRAN

Tabel 1. Data Tegangan

Power Flow Solution by Newton-Raphson Method

Maximum Power Mismatch = 2.00818e-08

No. of Iterations = 9

Bus No.	Voltage Mag	Angle Degree	Load		Generation		Injected Mvar
			Mw	Mvar	Mw	Mvar	
1	1,050	0,000	0,000	0,000	173,067	0,290	0,000
2	1,043	-3,278	21,700	12,700	65,563	26,671	0,000
3	1,026	-5,383	2,400	1,200	0,000	0,000	0,000
4	1,017	-6,606	7,600	1,600	0,000	0,000	0,000
5	1,010	-10,131	94,200	1,900	22,914	10,600	0,000
6	1,011	-7,864	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	1,003	-9,324	22,800	10,900	0,000	0,000	0,000
8	1,010	-8,385	30,000	30,000	10,000	33,818	0,000
9	1,010	-10,191	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,988	-12,082	5,800	2,000	0,000	0,000	0,000
11	1,052	-9,069	0,000	0,000	10,000	21,516	0,000
12	1,009	-11,356	11,200	7,500	0,000	0,000	0,000
13	1,041	-10,440	0,000	0,000	12,000	23,588	0,000
14	0,992	-12,335	6,200	1,600	0,000	0,000	0,000
15	0,986	-12,402	8,200	2,500	0,000	0,000	0,000
16	0,992	-11,934	3,500	1,800	0,000	0,000	0,000
17	0,984	-12,283	9,000	5,800	0,000	0,000	0,000
18	0,974	-13,062	3,200	0,900	0,000	0,000	0,000
19	0,970	-13,242	9,500	3,400	0,000	0,000	0,000
20	0,974	-13,015	2,200	0,700	0,000	0,000	0,000
21	0,974	-12,574	17,500	11,200	0,000	0,000	0,000
22	0,975	-12,556	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,972	-12,797	3,200	1,600	0,000	0,000	0,000

Bus No.	Voltage Mag	Angle Degree	Load		Generation		Injected
			Mw	Mvar	Mw	Mvar	Mvar
24	0,962	-12,941	8,700	6,700	0,000	0,000	0,000
25	0,965	-12,851	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0,947	-13,318	3,500	2,300	0,000	0,000	0,000
27	0,977	-12,499	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	1,006	-8,405	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,956	-13,851	2,400	0,900	0,000	0,000	0,000
30	0,944	-14,824	10,600	1,900	0,000	0,000	0,000

$B = \begin{bmatrix} 0,0220 & 0,0107 & 0,0005 & -0,0047 & -0,0011 & 0,0011 \\ 0,0107 & 0,0162 & 0,0005 & -0,0064 & -0,0010 & 0,0025 \\ 0,0005 & 0,0005 & 0,0214 & -0,0315 & -0,0179 & -0,0158 \\ -0,0047 & -0,0064 & -0,0315 & 0,1821 & 0,0414 & 0,0250 \\ -0,0011 & -0,0010 & -0,0179 & 0,0414 & 0,0578 & 0,0008 \\ 0,0011 & 0,0025 & -0,0158 & 0,0250 & 0,0008 & 0,1131 \end{bmatrix}$

$B0 = \begin{bmatrix} -0,0001 & 0,0017 & -0,0024 & 0,0055 & 0,0040 & 0,0052 \end{bmatrix}$

$B00 = 4,90E-04$

Total system loss = 10,1431 MW

Tabel 2. Daya terbangkitkan menggunakan EGA-PSO Tanpa Valve Point Effect

Interval waktu ke-	P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P5 (MW)	P6 (MW)	Biaya \$/h
1	165,07	59,08	20,04	18,25	10,37	10,60	613,56
2	162,76	52,12	22,37	27,23	12,22	12,09	661,97
3	165,07	59,08	20,04	18,25	10,37	10,60	662,89
4	161,96	51,46	21,28	23,97	12,85	12,68	634,67
5	160,97	53,92	23,70	24,21	16,39	22,15	754,71
6	159,81	66,02	23,15	25,85	16,98	20,29	760,50
7	176,24	51,37	22,96	28,40	14,97	12,48	774,11
8	188,01	53,54	23,94	27,29	20,24	15,16	716,96
9	187,41	65,82	24,34	27,11	20,71	20,36	754,48

Interval waktu ke-	P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P5 (MW)	P6 (MW)	Biaya \$/h
10	186,63	68,51	25,17	27,74	23,58	22,05	853,16
11	186,20	72,67	25,44	24,83	23,23	22,72	874,98
12	184,64	63,33	24,77	24,14	21,94	20,41	908,50
13	183,37	73,48	24,29	24,30	22,66	20,21	790,07
14	185,72	77,84	29,14	25,11	22,35	22,04	761,91
15	185,20	77,52	26,22	24,80	22,48	22,28	798,10
16	185,39	75,34	25,70	24,17	23,37	22,56	905,98
17	185,49	74,12	25,70	24,17	23,37	20,56	826,15
18	197,49	73,40	25,12	24,86	23,38	22,77	909,69
19	198,18	78,67	28,17	25,98	25,76	25,55	1042,32
20	197,25	79,71	21,38	28,55	24,49	25,83	1019,82
21	197,39	76,25	22,79	24,90	24,73	20,39	851,15
22	186,93	75,48	23,41	24,90	15,96	14,82	809,85
23	192,51	53,52	23,52	24,90	16,15	13,90	883,31
24	177,88	52,35	22,83	28,70	15,06	13,51	834,20
Total	4357,56	1584,59	575,48	602,59	463,62	446,01	19403,02

Tabel 3. Daya terbangkitkan menggunakan EGA-QP Tanpa Valve Point Effect

Interval waktu ke-	P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P5 (MW)	P6 (MW)	Biaya \$/h
1	159,35	43,00	23,46	18,71	22,74	16,14	613,95
2	160,98	43,74	23,98	28,75	17,33	14,01	662,41
3	159,35	43,00	23,46	18,71	22,74	16,14	663,29
4	169,34	43,00	20,96	24,80	12,57	13,54	634,97
5	169,59	42,88	26,79	19,54	20,40	22,15	754,94
6	187,08	43,00	23,07	28,20	15,65	15,10	760,64
7	187,35	41,54	22,92	23,89	15,19	15,53	874,59
8	181,27	59,89	21,86	27,65	22,21	15,30	817,69
9	183,46	70,92	24,81	25,07	24,13	17,37	855,36
10	190,00	71,77	25,53	27,33	20,86	18,20	754,25
11	184,67	75,43	26,27	27,30	23,05	18,39	775,87
12	183,53	71,22	24,36	27,52	15,52	17,09	909,54
13	183,83	73,45	28,79	22,66	19,43	20,15	890,85
14	185,25	73,91	29,53	29,63	23,19	20,67	862,37
15	185,75	75,33	29,03	27,19	20,39	20,82	898,15
16	184,89	76,71	24,71	29,50	20,23	20,48	907,01
17	185,35	78,17	21,18	27,62	22,08	19,00	826,74
18	185,61	79,39	25,71	27,85	23,46	24,98	910,21
19	185,93	79,90	35,00	29,09	27,36	25,03	1042,74
20	185,49	79,71	33,44	28,55	24,49	25,53	1020,52
21	185,96	76,25	34,22	24,90	24,73	20,39	851,73
22	186,93	75,48	23,41	24,90	15,96	14,82	710,28
23	186,77	59,69	23,07	24,90	15,65	14,42	683,89
24	179,44	52,35	22,83	27,14	15,06	13,51	635,02
Total	4337,18	1529,71	618,38	621,40	484,41	438,75	19317,00

Tabel 4. Daya terbangkitkan menggunakan EGA-PSO dengan valve Point Effect

Interval waktu ke-	P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P5 (MW)	P6 (MW)	Biaya \$/h
1	179,47	51,15	15,00	13,54	11,91	12,33	817,06
2	179,66	51,22	15,00	14,00	14,00	14,92	864,93
3	179,47	51,15	15,00	13,54	11,91	12,33	865,39
4	179,79	51,06	15,00	13,41	11,83	13,11	736,85
5	178,99	52,00	22,00	15,47	14,37	18,51	757,28
6	183,93	52,50	22,85	19,46	14,65	18,72	762,53
7	184,76	55,87	22,88	15,00	15,91	12,00	877,74
8	184,60	53,01	30,63	32,37	15,10	12,47	619,64
9	186,72	79,59	22,90	33,01	10,72	12,81	658,69
10	182,00	69,16	30,79	31,29	17,48	22,96	657,59
11	182,06	79,57	22,90	33,56	19,88	17,14	678,75
12	183,13	50,76	30,04	32,02	19,86	23,41	811,78
13	183,20	71,61	23,86	32,69	19,78	17,16	994,19
14	191,14	72,55	25,19	33,37	19,79	20,15	964,95
15	180,96	78,51	25,00	34,23	19,48	20,32	999,49
16	182,36	78,31	25,11	31,23	19,67	19,84	908,72
17	183,25	78,48	24,00	30,82	19,60	17,44	928,95
18	197,07	78,31	24,64	31,88	23,76	19,36	912,40
19	192,31	78,45	30,03	34,35	23,35	23,82	1046,19
20	187,90	78,54	30,41	34,00	23,25	23,11	1021,64
21	182,46	79,15	25,64	31,23	24,53	23,43	852,95
22	183,64	70,15	21,00	30,71	19	17,00	813,39
23	173,97	70,29	15,00	33,18	19,83	12,23	880,97
24	166,86	73,29	15,00	32,18	11,00	12,00	837,49
Total	4389,70	1604,68	549,87	656,54	420,67	416,57	20269,55

Tabel 5. Daya terbangkitkan menggunakan EGA-QP dengan valve Point Effect

Interval waktu ke-	P1 (MW)	P2 (MW)	P3 (MW)	P4 (MW)	P5 (MW)	P6 (MW)	Biaya \$/h
1	179,06	49,08	20,04	11,25	10,37	13,60	716,66
2	173,18	60,07	22,91	10,63	10,00	12,00	764,29
3	167,25	56,70	22,86	13,45	10,45	12,69	764,96
4	174,14	49,23	22,52	14,76	10,97	12,58	736,42
5	180,15	48,58	22,85	25,66	11,55	12,56	856,37
6	189,57	61,17	22,87	14,09	12,10	12,31	862,47
7	180,62	51,03	22,09	14,73	22,65	15,29	876,65
8	189,49	62,34	22,41	21,40	15,06	17,48	818,95
9	190,27	52,19	28,57	26,81	24,87	23,04	857,86
10	190,88	73,52	28,62	20,89	27,03	12,75	756,60
11	192,88	79,01	30,65	28,78	11,01	12,78	877,97
12	190,58	70,87	23,82	20,08	17,56	16,32	811,49
13	186,36	73,61	30,69	29,34	16,30	12,00	793,47
14	191,34	73,40	31,18	28,00	13,87	24,41	764,59
15	191,44	70,77	23,81	37,29	15,41	19,78	898,97
16	185,55	70,62	22,86	30,79	18,71	27,99	908,15
17	193,98	63,73	30,75	31,04	13,68	20,22	828,30
18	195,09	73,73	30,75	31,04	13,68	20,22	911,85
19	197,17	75,05	34,25	31,67	13,85	25,12	1044,66
20	197,13	74,05	30,30	35,65	15,65	24,43	1020,72
21	189,24	74,85	22,65	33,52	28,54	17,66	852,74
22	198,95	58,30	30,72	22,06	12,57	18,91	712,31
23	195,00	49,58	24,73	27,99	12,36	14,83	885,57
24	187,29	51,08	22,85	22,37	10,87	15,87	636,84
Total	4506,61	1522,57	625,74	583,26	369,10	414,85	19958,85

Tabel 6. Load Bus Data

Bus No	Load		Load		
	P (MW)	Q (MVar)	Bus No	P (MW)	Q (MVar)
1	0	0	16	3.5	1.8
2	21.7	12.7	17	9	5.8
3	2.4	1.2	18	3.2	0.9
4	7.60	1.6	19	9.5	3.4
5	94.2	1.9	20	2.2	0.7
6	0	0	21	17.5	11.2
7	22.8	10.9	22	0	0
8	30	30	23	3.2	1.6
9	0	0	24	8.7	6.7
10	5.8	2	25	0	0
11	0	0	26	3.5	2.3
12	11.2	7.5	27	0	0
13	0	0	28	0	0
14	6.2	1.6	29	2.4	0.9
15	8.2	2.5	30	10.6	1.9

Tabel 7. Shunt Capacitor Data

Bus No	Susceptance
10	19
24	4

Tabel 8. Transmission Line Data

Line No	From Bus	To bus	Series Impedance (p.u.)		Half Line Charging susceptance	Tap Setting	MVA Rating
			R	X			
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264	-	130
2	1	3	0.0452	0.1652	0.0204	-	65
3	2	4	0.057	0.1737	0.0184	-	130
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	-	130
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	-	130
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	-	65
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	-	90
8	5	7	0.046	0.116	0.0102	-	70
9	6	7	0.0267	0.082	0.0085	-	130
10	6	8	0.012	0.042	0.0045	-	32
11	6	9	0	0.208	0	10.155	65
12	6	10	0	0.556	0	0.9629	32
13	9	11	0	0.208	0		65

Line No	From Bus	To bus	Series Impedance (p.u.)		Half Line Charging susceptance	Tap Setting	MVA Rating
			R	X			
14	9	10	0	0.11	0	-	65
15	4	12	0	0.256	0	10.129	65
16	12	13	0	0.14	0	-	65
17	12	14	0.1231	0.2559	0	-	32
18	12	15	0.0662	0.1304	0	-	32
19	12	16	0.0945	0.1987	0	-	32
20	13	15	0.221	0.1997	0	-	16
21	16	17	0.0524	0.1923	0	-	16
22	15	18	0.1073	0.2185	0	-	16
23	18	19	0.0639	0.1292	0	-	16
24	19	20	0.034	0.068	0	-	32
25	10	20	0.0936	0.209	0	-	32
26	10	17	0.0324	0.0845	0	-	32
27	10	21	0.0348	0.0749	0	-	32
28	10	22	0.0727	0.1499	0	-	32
29	21	22	0.0116	0.0236	0	-	32
30	15	23	0.1	0.202	0	-	16
31	22	24	0.115	0.179	0	-	16
32	23	24	0.132	0.27	0	-	16
33	24	25	0.1885	0.3292	0	-	16
34	25	26	0.2544	0.38	0	-	16
35	25	27	0.1093	0.2087	0	-	16
36	28	27	0	0.396	0	0.9581	65
37	27	29	0.2198	0.4153	0	-	16
38	27	30	0.3202	0.6027	0	-	16
39	29	30	0.2399	0.4533	0	-	16
40	8	28	0.0636	0.2	0.0214	-	32
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0065	-	32

DAFTAR INDEX

PSO	= <i>Particle Swarm Optimization</i>
QP	= <i>Quadratic Programming</i>
GA	= <i>Genetic Algorithm</i>
E-GA	= <i>Enhanced-Genetic Algorithm</i>
OPF	= <i>Optimum Power Flow</i>
DOPF	= <i>Dynamic Optimum Power Flow</i>
DED	= <i>Dynamic Economic Dispatch</i>
VPE	= <i>Valve Point Effect</i>
a_i, b_i, c_i	= koefisien kuadrat biaya pembangkit unit i
e_i, f_i	= koefisien biaya valve point effect pembangkit unit i
f_{VD}	= tegangan deviasi
f_{PL}	= rugi daya saluran transmisi
g_i	= generator i
P_{Gi}	= daya aktif
Q_{Gi}	= daya reaktif
V_{Gi}	= tegangan i
P_i^{min}, P_i^{max}	= daya minimum, maximum pembangkit
δ_i	= ramp limit generator
x_j	= kromosom
u_i^{min}, u_i^{max}	= variabel kontrol min max untuk membangkitkan populasi
N_{ui}	= panjang gen
P_c	= probabilitas <i>crossover</i> (kawin silang)
P_m	= probabilitas mutasi
$X1, X2, X3$	= inisialisasi pembangkit pada Quadratic Programming
Y	= inisialisasi populasi EGA
X	= konstanta
K	= konstanta minimum dari Quadratic Programming
Y_{ij}	= admitansi bus i

